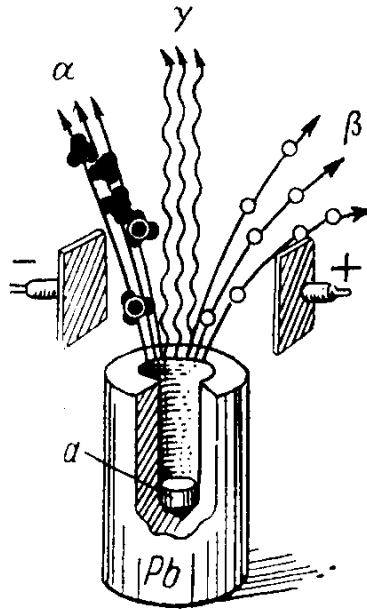


**КРАПИВИНА Е.В.**

**ИВАНОВ Д.В.**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ**



**БРЯНСК 2014**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ**  
Учебное пособие

БРЯНСК 2014

УДК 539.16+619:616-001.28/29

Крапивина Е.В., Иванов Д.В. Физические основы радиобиологии (Учебное пособие). Брянск. Изд-во БГСХА, 2014.- 184 с.: 36 ил.

В пособии представлены основные положения атомной и ядерной физики, ядерные реакции и процессы радиоактивного распада, которые являются фундаментом при изучении взаимодействия ионизирующих излучений со средой. Рассматриваются дозовые характеристики ионизирующих излучений. Эти вопросы необходимы для усвоения курса по дисциплинам "Ветеринарная радиобиология" (111801) и "Сельскохозяйственная радиобиология в животноводстве" (111100) как под руководством педагога, так и в процессе самостоятельной работы.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов сельскохозяйственных вузов, изучающих радиологию, сельскохозяйственную радиологию, ветеринарную радиобиологию и радиоэкологию.

Рецензенты:

*Доктор биологических наук, профессор кафедры кормления животных и частной зоотехнии Брянской ГСХА, академик МАНЭБ С.Е. Яковлева*

ISBN

2014

© Крапивина Е.В., Иванов Д.В.

© Брянская ГСХА, 2014

## ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СТРОЕНИИ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

### 1.1. Взаимосвязь массы и энергии

Материя обладает массой и энергией. Она существует в двух физических видах - в виде вещества и в виде электромагнитных полей (с излучением различной длины волны - от радиоволн до гамма-лучей). Существенное различие между обоими видами материи заключается в том, что вещество обладает массой покоя, а электромагнитные колебания (например, видимый свет) массы покоя не имеют.

Закон взаимосвязи материи и энергии ( $E = mc^2$ ) гласит, что энергия ( $E$ ) любого тела в состоянии покоя равна его массе ( $m$ ), умноженной на квадрат скорости света ( $c^2$ ).

Так как масса и энергия взаимосвязаны, то массу можно выразить в эквивалентных величинах энергии и наоборот. Наиболее употребляемыми единицами измерения энергии являются калория, джоуль, эрг:  $1 \text{ кал} = 4,186 \text{ Дж}$ ,  $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$ . Для обозначения энергии в масштабах микромира даже эрг является слишком большой величиной. В ядерной физике энергию частиц выражают в электронвольтах (эВ). Электронвольт - энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В. Величина энергии, равная 1 тыс. эВ называется килоэлектронвольт (кэВ), а равная 1 млн. эВ - мегаэлектронвольт (МэВ).  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$ , а  $1 \text{ эрг} = 6,24 \cdot 10^5 \text{ МэВ}$ .

Массу обычно выражают в граммах, килограммах и т.д. Но абсолютной массой атомов, выраженных в граммах, трудно пользоваться, например масса атома водорода составляет  $1,67 \cdot 10^{-24}$  грамма. Поэтому все расчеты легче выполнять при употреблении другой величины - атомной единицы массы, которая показывает во сколько раз атом данного элемента тяжелее  $1/12$  части атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . Масса атома водорода, выраженная в атомных единицах

массы, составляет 1 а.е.м. Энергетический эквивалент 1 а.е.м. составляет 931 МэВ.

Вопросы для самоконтроля.

1. В каких физических видах существует материя?
2. В чем различие между физическими видами материи?
3. Современная трактовка закона взаимосвязи материи и энергии.
4. Дать определение понятию – «электронвольт».
5. Что означает величина «атомная единица массы атома», например, кислорода, серы и т.д.
6. Чему равен энергетический эквивалент 1 а.е.м., 4а.е.м.?

## 1.2. Строение вещества

Природа состоит из живой и неживой материи, а она в свою очередь из простых и сложных веществ. К простым веществам относят атомы, а к сложным - химические соединения, состоящие из атомов. *Атом, это мельчайшая частица химического элемента, являющаяся носителем его химических свойств* (от греч. атом - неделимый). *Химический элемент - совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра и числом протонов, совпадающим с порядковым (атомным) номером в таблице Менделеева.* Каждый химический элемент имеет свои название и символ. *Молекула, это мельчайшая частица сложного вещества, она состоит из атомов одного или нескольких элементов*, например, молекула воды состоит из 2 атомов водорода и 1 атома кислорода (H<sub>2</sub>O). В природе только инертные газы обнаруживаются в виде атомов, так как их внешние оболочки максимально заполнены электронами, все остальные вещества существуют в виде молекул.

*Атом можно представить в виде шара, который состоит из электронного облака и ядра. В ядре находятся*

*нуклоны (положительно заряженные протоны (p) и нейтрально заряженные нейтроны (n)). Планетарная модель атома была предложена в 1911 году Э.Резерфордом, которая более детально была разработана Н.Бором (1913). Согласно этой модели, в центре атома расположено ядро, имеющее положительный заряд. Вокруг ядра перемещаются по эллиптическим орбитам электроны, образующие электронную оболочку атома.*

Атомная масса любого атома, в основном, складывается из массы протонов и нейтронов (масса электронов ничтожна).

В электронейтральном атоме суммарное количество электронов на орбитах всегда равно сумме протонов, находящихся в ядре. Например, атом гелия содержит два протона в ядре и имеет два электрона на орбите, атом натрия - 11 протонов в ядре и 11 электронов на орбитах, атом свинца - 82 протона в ядре и 82 электрона на орбитах и так далее. В силу равенства суммы положительных и отрицательных зарядов атом является электронейтральной системой, и число электронов в электрически нейтральном атоме равно порядковому номеру элемента (количеству протонов) в таблице Д.И.Менделеева.

Атомы чрезвычайно малы. Например, грамм железа состоит из  $10^{22}$  атомов, а диаметр каждого из них равен  $2,56 \cdot 10^{-8}$  см. Атом наиболее простого элемента - водорода - имеет еще меньшие размеры. Диаметр его равен  $0,5 \cdot 10^{-8}$  см. На самом деле, атом не имеет определенных геометрических размеров. Размеров в том смысле, какой мы вкладываем в это понятие, имея перед глазами, например, бильярдный шар. Конечно, поскольку атом имеет определенные очертания, можно выделить ту его часть, в которой плотность электронного облака максимальна, и назвать эту часть его размером. Один химический элемент отличается от другого только числом протонов и расположением элементарных частиц.

Центральное ядро имеет вид шара, состоящего из сильно связанных протонов и нейтронов. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Из-за квантовых эффектов орбиты электронов на самом деле не соответствуют четко определенным траекториям, показанным на рисунке 1.

Атом любого элемента можно разделить на субатомные (элементарные) частицы, и в этом случае он утратит свойства, характерные для данного элемента. К элементарным частицам относят электроны ( $e^-$ ), позитроны ( $e^+$ ), протоны ( $p$ ), нейтроны ( $n$ ), мезоны ( $\mu$ ), нейтрино ( $\nu$ ), и ряд других. Некоторые из них имеют сложное строение и при определенных условиях могут превращаться друг в друга. Однако определение "элементарные" не означает, что эти частицы простейшие, бесструктурные элементы материи, и электрон, например, так же сложен, как и атом.

Не следует путать массовое число атома с атомной массой элемента. Атомной массой атома называют отношение массы атома данного элемента к  $1/12$  массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , она измеряется в а.е.м. (до 1961 г. использовалась кислородная шкала). Предпочтение углероду отдано потому, что его природная изотопная смесь обычно более постоянна и состоит из 99%  $^{12}\text{C}$  и 1%  $^{13}\text{C}$ , а  $^{14}\text{C}$  представляет ничтожно малую величину.

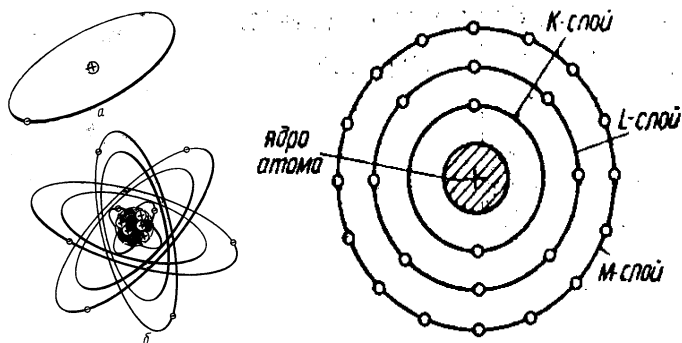


Рис. 1. Схематическое изображение атома (а - водорода, б - кислорода) и слоев электронной оболочки.

*Массовое число, это целночисленное выражение атомной массы элемента и обозначается символом М. Другими словами, массовое число элемента, это суммарное количество его нуклонов (количество протонов + количество нейтронов) - величина безразмерная. Например, массовое число обычного углерода равно 12 (6р + 6n), а тяжелого урана - 238 (92 р + 146n). В ядерной физике атомный номер пишут слева внизу от символа химического элемента, а массовое число - также слева, но наверху от него. Так как атомный номер для каждого элемента- постоянное число, то его часто опускают и пишут:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{238}\text{U}$ .*

Почему же атомная масса химических элементов в таблице Менделеева является дробной величиной? Дело в том, что большинство элементов в природе представляет собой смесь своих разновидностей (*изотопов*), имеющих в своих ядрах одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. В связи с этим, они помещаются в одной и той же клетке таблицы Менделеева и имеют одинаковые химические свойства. Поскольку все разновидности каждого данного элемента занимают в таблице Д.И.Менделеева одинаковое место, то их назвали изотопами данного элемента (от греческого *isos* -одинаковый и *topos* - место). Большинство (71 из 90) природных элементов представляет собой смесь от 2 до 10 (олово) изотопов. В природной смеси элемента обычно преобладает какой-либо один изотоп, а остальные составляют ничтожную долю. Например, природный кислород состоит из смеси трех изотопов  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$ , а процентное содержание их соответственно составляет 99,76; 0,04 и 0,2%. Изотопы есть у всех элементов таблицы Менделеева. Химически чистое вещество всегда представляет собой смесь изотопов данного элемента, которые содержатся в нем в разных пропорциях. Поэтому следует также разграничивать понятия "относительная атомная масса атома" и "относительная атомная масса элемента". Значения относительных атомных масс изотопов очень близки к целым числам.



Химический элемент - это вид атомов с одинаковым зарядом ядра, поэтому атомные массы элементов, как совокупности изотопов, выражаются дробными числами. Например, относительная атомная масса элемента хлора 35,5. Это объясняется тем, что элемент хлор состоит из двух изотопов с относительными атомными массами, очень близкими к 35 и 37. Изотопа  $^{35}\text{Cl}$  содержится в природной смеси 75%, а изотопа  $^{37}\text{Cl}$  - 25%. Отсюда средняя относительная атомная масса элемента хлора равна:

$$35 \cdot 0,75 + 37 \cdot 0,25 = 35,5.$$

Именно этим объясняется и то, что в некоторых случаях у элементов с большим порядковым номером атомная масса меньше, чем у элементов с меньшим порядковым номером, например в парах элементов: аргон и калий, теллур и йод. Это зависит от того, какие изотопы, тяжелые или легкие, преобладают в данном элементе. Элемент калий состоит преимущественно из более легких, а аргон - из более тяжелых изотопов. Атомная масса каждого из природных элементов, указанная в периодической системе элементов Д.И.Менделеева, складывается из а.е.м. изотопов его природной смеси, поэтому массовое число элемента является дробным.

Вопросы для самоконтроля.

1. Дать определения понятиям: атом, элемент, молекула.
2. Строение атома.
3. Что означает «массовое число» атома кислорода, азота, калия и т.д.?
4. Что означает понятие «изотопы».
5. Почему атомная масса химических элементов в таблице Менделеева является дробной величиной?

### 1.3. Характеристика электрона и некоторых его свойств

Электрон ( $e^-$ ) - устойчивая элементарная частица с массой покоя (масса частицы, скорость которой равна нулю), равной 0,000548 а.е.м., в абсолютных единицах массы -  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г. Энергетический эквивалент электрона составляет 0,511 МэВ. *Электрон несет один элементарный, равный по величине протону, но отрицательный заряд электричества, поэтому его обозначают символом  $e^-$ .*

Атом простейшего элемента- водорода - имеет лишь один электрон и масса его по сравнению с массой ядра водорода ничтожно мала (0,00054 часть). Нейтральный атом каждого следующего по порядку в таблице Д.И.Менделеева элемента имеет на один электрон больше предыдущего (в соответствии с количеством протонов в ядре). Так, например, гелий имеет 2, литий - 3, бериллий - 4 и так далее электрона, а уран, заключающий таблицу естественных элементов,- 92 электрона. Но так как масса ядра урана примерно в 238 раз больше массы ядра водорода, то масса 92 электронов составляет еще меньшую долю в массе урана - лишь 0,00021 часть.

*Каждый электрон вращается на эллипсоидной орбите, вмещающей не более двух электронов. При наличии трех и больше электронов они вращаются на орбитах разных радиусов, или, как говорят, на разных подуровнях. Электроны, вращающиеся на этих эллипсоидных орбитах, группируются в определенные электронные слои, окружающие ядро. Количество слоев у различных атомов не одинаковое. В атомах с большой атомной массой число орбит достигает семи. Соответственно числу электронных слоев в периодической системе все элементы размещаются в семи периодах. Расчеты показывают, что заполненные слои вмещают число электронов, равное удвоенному квадрату порядкового номера оболочки ( $2n^2$ ). Но, начиная с 5-го слоя (О-слой) оболоч-*

ки даже у самых тяжелых элементов полностью не загружены. Например, у атома урана в О-слое имеется 21, в Р-слое - 9, в последнем - Q-слое лишь 2 электрона, и только первые 4 слоя заполнены максимально. *Электронные оболочки обуславливают важнейшие свойства вещества - электропроводимость, валентность, взаимодействие с электромагнитным излучением и многое другое.*

Находясь в непрерывном круговом движении, электрон совершает вокруг ядра огромное число оборотов в секунду, пролетая за этот промежуток времени около 22 тыс. км. Движение электрона в атоме, как и сам факт существования атомов, определяется, в основном, наличием кулоновского поля ядра.

*На каждый из движущихся вокруг ядра электронов действуют две равные, но противоположно направленные силы: кулоновская (центростремительная) сила притягивает электроны к ядру за счет разности зарядов ядра и электрона, а равная ей центробежная сила, возникающая за счет инерции движения электрона по орбите, направлена от ядра.* Кроме того, электроны, вращаясь по орбите, одновременно обладают собственным моментом количества движения, то есть, подобно волчку, вращаются вокруг собственной оси. Собственный момент количества движения носит название "спин", Спины отдельных электронов могут быть ориентированы параллельно или антипараллельно друг другу. Все это обеспечивает устойчивое движение электронов в атоме.

Однако на все электроны в атоме (кроме электронов 1 орбиты) действуют не только кулоновская сила притяжения и центробежная сила инерции, но и *сила отталкивания других электронов.* Этот эффект называют экранировкой. Чем дальше электронная орбита от ядра, тем сильнее экранировка электронов за счет силы отталкивания электронами, расположенными на более близких к ядру орбитах, и тем слабее энергетическая связь этих электронов с ядром.

Чем ближе к ядру вращается электрон, тем больше его энергия связи с ядром (потенциальная энергия), но уровень энергии вращения (кинетическая энергия) меньше. На внешних орбитах энергия связи электронов не превышает 1 - 2 эВ. Поэтому электрон с внешней орбиты атома сорвать легче, чем с внутренней. Наибольшей энергией связи с ядром обладают электроны 1 орбиты (К-слоя), и она тем выше, чем выше атомный номер элемента (у углерода - 0,28 кэВ, у стронция - 16 кэВ, у цезия - 36 кэВ, у урана - 0,12 МэВ). Нейтральный атом может находиться в основном (невозбужденном или стационарном) состоянии сколь угодно долго, если на него не оказывать воздействия извне. При этом электроны вращаются по своим стационарным орбитам, не излучая и не поглощая энергию.

*При сообщении электронам извне дополнительной энергии (облучение, механическое воздействие, передача тепла) они могут переходить со своего энергетического уровня (орбиты) на другой, более удаленный от ядра уровень (процесс возбуждения) или даже покидать пределы данного атома (процесс ионизации). При этом, электрон не может поглощать произвольные порции энергии. Поскольку в каждом слое электроны имеют свой уровень энергии, то перескок электрона с орбиты на орбиту всегда связан с поглощением или высвобождением энергии. Но так как орбиты имеют строго определенные диаметры, то изменения энергии при перескоках не могут иметь любое значение, а совершаются ступенчато, определенными порциями. Согласно первому постулату Бора энергия электрона в атоме не может быть любой, а может принимать только некоторые разрешенные значения.*

По гипотезе Планка, энергия электромагнитных волн может излучаться и поглощаться определенными порциями (квантами), кратными некоторой энергии ( $E$ ), то есть может принимать значения  $E$ ,  $2E$ ,  $3E$ , ...,  $nE$ . Величина элементар-

*ной порции энергии (E) называется квантом энергии:  $E = h\nu$ , где  $\nu$  - частота колебаний, а  $h$  - универсальная постоянная Планка (квант действия),  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж/с. Так как, согласно де Бройлю, корпускулярно-волновая двойственность характерны не только для световых частиц - фотонов, но и для частиц вещества, имеющих массу покоя - электронов, протонов, нейтронов (и, в целом атомных ядер, и атомов, и молекул), то движение электрона по орбите также имеет характер волны. Следовательно, электрон может поглотить только такое количество энергии, которое позволит его длине волны уложиться в новой орбите целое число раз. Таким образом, электрон на стационарной орбите в атоме может поглотить только такой квант, который либо перебросит его из одного стационарного состояния в другое, либо выбросит его из атома.*

Так, если воздействие будет слабее энергии связи электрона с ядром, то электрон перейдет лишь с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра. Иными словами, электрон поднимется на новый энергетический уровень. Такой атом остается нейтральным, однако он отличается от остальных нейтральных атомов этого химического элемента избытком энергии. *Атомы, обладающие избытком энергии, называются возбужденными, а переход электронов с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра - процессом возбуждения.*

Ниже (рис. 2) представлены объемные изображения атома водорода в различных состояниях возбуждения.

В невозбужденном атоме водорода электрон находится на низшей электронной орбите с номером  $n=1$ . Величина энергии, которой он при этом обладает, называется его основным (стационарным) энергетическим уровнем. В целом, атом водорода в стационарном состоянии ( $1s\sigma$ ) очень похож на шар. Однако форма возбужденных атомов отличается от сферической, и тем больше, чем сильнее возбужден атом.

При возбуждении атома, энергия затрачивается как раз на перестройку его электронного облака. Каждой форме облака соответствует своя, вполне определенная энергия. Поэтому, чтобы перевести атом из одной формы в другую, необходимо затратить строго отмеренное количество энергии – квант ( $h\nu$ ). По существу, только атом водорода физика знает сейчас во всех деталях и имеет его правдоподобный образ. Форма электронного облака в сложных атомах в целом также не очень сильно отличается от приведенных на рисунке 2, но рассчитать ее достаточно точно можно лишь с помощью современных вычислительных машин.

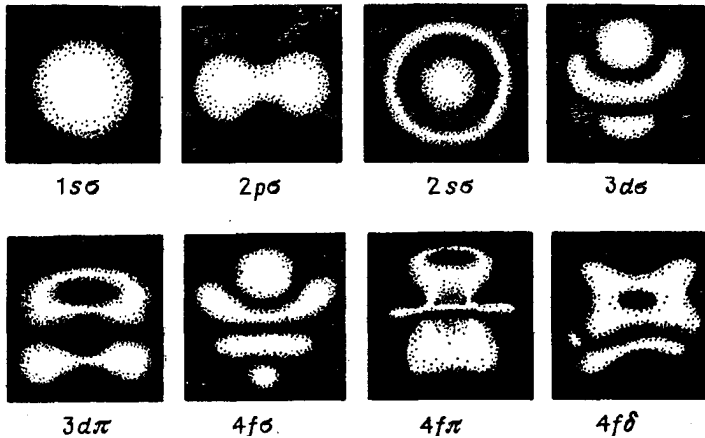


Рис. 2. Объемные изображения атома водорода в различных состояниях возбуждения [38].

*Так как связь атомов в молекуле осуществляется за счет наложения атомных орбиталей по принципу максимального перекрывания, то понятно, что атомы в возбужденном состоянии способны вступать в реакции, невозможные для них в стационарном состоянии.*

Поскольку в природе всякая система стремится перейти в положение, при котором ее энергия будет наименьшей, то и атом из возбужденного состояния переходит в менее возбужденное или в основное состояние, излучив порцию энер-

гии в виде электромагнитного излучения большей длины волны. Таким образом, возвращение атома в обычное состояние сопровождается выделением избыточной энергии, но уже значительно меньшей, чем было получено. В состоянии возбуждения атома его "время жизни" составляет стомиллионные доли секунды, после чего электрон опускается на более низкий энергетический уровень, то есть возвращается на более близкую к ядру орбиту.

Энергия электромагнитной волны, поглощенная в процессе возбуждения атома или излученная при переходе атома в менее возбужденное или основное состояние, определяется разностью энергий конечного и начального состояний атома ( $E_{n_1}$  и  $E_{n_2}$ ). Поскольку, согласно формуле Планка, энергия электромагнитной волны в одном акте поглощения или излучения определяется частотой волны  $\nu$ , то есть равна  $h\nu$ , где  $h$  - постоянная Планка, то она связана с энергией атома в конечном и начальном состояниях соотношением:

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1},$$

где  $n_2$  - номер энергетического уровня (номер электронной орбиты) конечного состояния атома, а  $n_1$  - номер энергетического уровня (номер электронной орбиты) начального состояния атома. Таким образом, частота излучения энергии возбужденным атомом целиком определяется номерами

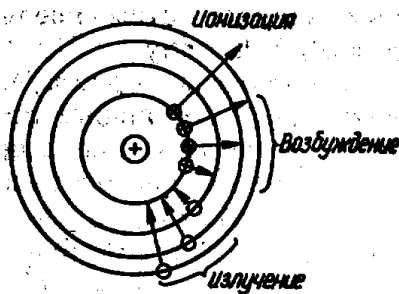


Рис.3. Схема электронных переходов в атоме [5].

электронных орбит, на которых пребывает электрон в начальном и конечном состояниях атома.

*Если же энергия, переданная электрону извне, превышает величину центробежной силы, то*

*этот электрон покинет атом, в результате чего атом станет положитель-*

но заряженным ионом. Этот процесс называется *ионизацией атома*. Какой либо нейтральный атом среды может поглотить "лишний" электрон, который "залетит" в сферу действия его кулоновских сил притяжения к ядру, в результате чего атом станет отрицательным ионом. Таким образом, на каждый положительный ион образуется один отрицательный ион, то есть возникает пара ионов. Атом в состоянии иона существует в обычных условиях чрезвычайно короткий промежуток времени. Свободное место на орбите положительного иона заполняется свободным электроном или положительный ион связывается с отрицательно заряженной группировкой рядом расположенной молекулы, тем самым восстанавливая электронейтральность. Этот процесс носит название рекомбинации ионов (деионизации) и сопровождается выделением избыточной энергии в виде излучения. Энергия, выделяющаяся при рекомбинации ионов, количественно примерно равна затраченной на ионизацию.

В том случае, если энергия поглощается электроном внутренней, например К-орбиты, и ее достаточно для преодоления кулоновской силы притяжения ядра, то электрон, поглотивший энергию, покидает атом, который при этом превращается в положительный ион. Кроме того, атом испускает электромагнитные излучения различной энергии, которые называются характеристическим рентгеновским излучением. Это явление обусловлено тем, что в природе всякая система стремится перейти в положение, при которой ее энергия будет наименьшей, энергия же, которую электроны затрачивают на свое существование (вращение по орбите вокруг ядра) увеличивается по мере удаления от ядра. Поэтому, как только освобождается место на внутренней орбите, туда устремляется электрон следующей, более удаленной от ядра орбиты. На освободившееся место переходит электрон следующей орбиты и так далее. *Переход электронов с внешних орбит на внутренние сопровождается электромагнитным излучением с длиной волны, харак-*



*терной для разницы между энергетическими значениями электронных уровней данного атома.* Переходы электронов в пределах внешних орбит дают оптический спектр, который состоит из ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей. Учитывая, что для каждого элемента энергетические значения электронных орбит строго определенные, индивидуальные, то, измерив длину волны рентгеновских излучений можно установить атомный номер элемента. Именно поэтому, такого рода излучения называются характеристическими.

Таким образом, с положением электронов в электронной оболочке связан ряд свойств атома: возбуждение, ионизация и излучение энергии. Процесс ионизации атомов имеет важное практическое значение для обнаружения и дозиметрии излучений, а также для понимания биологического действия ионизирующей радиации.

Вопросы для самоконтроля.

1. Масса, заряд и энергетический эквивалент электрона.
2. Во сколько раз масса электрона меньше массы протона?
3. Чему равно количество электронов в электронейтральном атоме?
4. Что происходит с электроном в электронном облаке атома, получившим некоторое количество энергии, но не превышающее энергию связи с ядром?
5. Чем может закончиться возбужденное состояние атома?
6. Что происходит с электроном в орбите атома, получившим некоторое количество энергии, но не превышающее энергию связи с ядром?
7. Что происходит с электроном в орбите атома, получившим некоторое количество энергии, превышающее энергию связи с ядром?

8. Что происходит с электронами в электронных слоях атома, если электрон К-слоя получил количество энергии, превышающее энергию связи этого электрона с ядром?
9. Каким образом по спектру рентгеновских характеристических излучений можно определить вид химического элемента?
10. Чем может закончиться ионизированное состояние атома?

#### **1.4. Строение ядра, характеристика ядерных сил, энергия связи нуклонов**

##### **1.4.1. Строение ядра**

Атом любого элемента можно разделить на субатомные (элементарные) частицы, но в этом случае он утратит свойства, характерные для данного элемента. Строение ядра оставалось неясным до начала 30-х годов. Ядро, как оказалось, также является сложной системой, состоящей из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных частиц - нейтронов.

Ядро атома имеет главное, определяющее значение для атома и, в частности, обуславливает строение его электронных оболочек. Вещество ядра чрезвычайно плотно упаковано ( $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>), вследствие чего занимает примерно  $1/10^{14}$  часть атома (примерно одну сто триллионную его часть). Диаметр ядра в 100000 раз меньше диаметра атома и у большинства элементов равен  $10^{-13}$  см. Эту величину называют ферми. Диаметр ядра водорода, самого легкого элемента, равен  $0,8 \cdot 10^{-13}$  см, ядра урана -  $1,9 \cdot 10^{-12}$  см. Объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Таким образом, плотность вещества во всех ядрах примерно одинакова. Почти все вещество атома (99,95 - 99,98%) сосредоточено в его ядре. Ядро обладает положительным зарядом электричества и массой, обусловленной его простейшими (элементарными) частицами. Однако понятие элементарности не следует

понимать как неделимость или неизменность. Некоторые из них имеют сложное строение и при определенных условиях могут превращаться друг в друга. Но они не состоят друг из друга, хотя некоторые из них имеют сложное строение. В свободном состоянии элементарные частицы характеризуются массой, электрическим зарядом (или его отсутствием) и собственным вращением (спином). Элементарные частицы по массе обычно подразделяют на четыре класса:

1. Фотоны -  $\gamma$ -кванты электромагнитного поля. Они не обладают электрическим зарядом и массой покоя. Фотон может существовать только в движении, его скорость равна скорости света, что составляет  $2,99776 \cdot 10^{10}$  см/сек., но чаще используется округленная величина - 300000 км/сек. Свойства электромагнитных излучений обусловлены их корпускулярно-волновой природой. Энергия фотона зависит от частоты колебания ( $E = h\nu$ ), причем, чем короче длина волны, тем больше частота колебания.

2. Лептоны получили свое название от греческого слова "лептос", которое означает "легкий". К их числу относятся электроны ( $e^-$ ), позитроны ( $e^+$ ), мюоны ( $\mu^-, \mu^+$ ), обнаруженный в 1975 г. тяжелый тау-лептон ( $t^-, t^+$ ), а также электронные нейтрино ( $\nu_e, \bar{\nu}_e$ ), мюонные нейтрино ( $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ ). Мюоны, электроны и позитроны имеют электрический заряд.

3. Мезоны - нестабильные частицы, к их числу принадлежат  $\pi$ -мезоны или пионы ( $\pi^+, \pi^-, \pi^0$ ), К-мезоны или каоны ( $K^+, K^-, K^0$ ) и эта-мезон ( $\eta$ ). Масса  $\pi$ -мезонов составляет  $\sim 270 m_e$  (электронных масс). Время их жизни имеет величину, порядка  $2,6 \cdot 10^{-8}$  сек. Все  $\pi$ -мезоны нестабильны и распадаются с образованием мюонов (+, -), нейтрино, антинейтрино, электронов (+, -) или  $\gamma$ -квантов. Масса К-мезонов составляет  $\sim 970 m_e$ . Время жизни К-мезонов имеет величину, порядка  $10^{-8}$  сек. Они распадаются с образованием  $\pi$ -мезонов и лептонов или только лептонов. Масса эта-

мезона равна  $1074m_e$ , время жизни порядка  $10^{-19}$  сек. Эта мезоны распадаются с образованием  $\pi$ -мезонов и  $\gamma$ -фотонов.

4. Класс барионов объединяет в себе протоны, нейтроны антипротоны, антинейтроны и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов, получившие название гиперонов. За исключением протона и антипротона, все барионы нестабильны. При распаде бариона, наряду с другими частицами, обязательно образуется барион.

Кроме перечисленных выше частиц, обнаружено большое число короткоживущих частиц, которые получили название резонансов. Эти частицы представляют собой резонансные состояния, образованные двумя или большим числом элементарных частиц. Время жизни резонансов составляет всего лишь  $\sim 10^{-23}$  -  $10^{-22}$  сек.

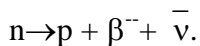
Всего известно 35 стабильных и относительно стабильных элементарных частиц со временем жизни не менее  $10^{-17}$  секунд. Число же короткоживущих частиц, со временем жизни порядка  $10^{-23}$  сек., значительно больше. Таким образом, определение "элементарные" не означает, что эти частицы простейшие, бесструктурные элементы материи.

Из всех видов частиц в радиобиологических процессах наиболее значимы протон, нейтрон, электрон и фотон.

*Протон* - одна из основных частиц, образующих ядро атома. Его масса покоя составляет 1,007596 а.е.м., то есть в 1836,13 раза больше массы электрона, что в абсолютном выражении составляет  $1,6725 \cdot 10^{-24}$  г. Радиус протона равен  $0,8 \cdot 10^{-13}$  см. Его символ - латинская буква p (protos- погречески первый). Число протонов в ядре строго постоянно для атомов каждого данного элемента и соответствует порядковому номеру элемента в таблице Д.И.Менделеева. Поэтому порядковый или атомный номер элемента показывает, сколько протонов входит в ядро атома данного элемента. Каждый протон несет один элементарный положительный заряд электричества. Таким образом, порядковый номер

элемента одновременно показывает число положительных зарядов в ядре и называется также зарядовым числом. Его обозначают символом  $Z$ . Каждому положительному заряду в ядре (протону) в оболочке атома соответствует отрицательный заряд (электрон). Число протонов в ядре определяет число электронов в оболочке атома, а не наоборот. Элемент и присущие ему химические свойства определяются, в конечном счете, числом протонов. Протоны, как одноименно заряженные частицы, испытывают электрические силы взаимного отталкивания, но одновременно и особые внутриядерные силы притяжения, удерживающие протоны в ядре. Находясь вне ядра, протоны длительное время сохраняют устойчивость (стабильность), не испытывая при этом превращений.

*Нейтрон* - второй вид ядерных частиц атомов всех элементов. Его нет лишь в ядре легкого водорода, состоящего из одного протона. Масса нейтрона составляет 1,008986 а.е.м., и равна 1838,7  $m_e$  или в абсолютном выражении  $1,6747 \cdot 10^{-24}$  г. Нейтроны в ядрах стабильны, а в свободном состоянии (вне ядра) неустойчивы. За каждые 12,8 минут половина свободных нейтронов испытывает распад. При этом нейтрон, испуская электрон и антинейтрино, превращается в протон. В отличие от протона нейтрон не несет заряда, он электрически нейтрален. Его символ - латинская буква  $n$  или  ${}_0n^1$ . Превращение свободного нейтрона в протон и электрон может быть записано так:



Число нейтронов ( $N$ ) не характеризует свойства элемента, так как в атомах одного и того же элемента разница в их числе может достигать до 5, а иногда и больше. Свободные нейтроны активно взаимодействуют с атомными ядрами многих элементов, в том числе с ядром водорода (протоном). Поэтому средняя продолжительность жизни свободного нейтрона в парафине, богатом атомами водорода, равна

только  $2 \cdot 10^{-4}$  секунд. Элементы, имеющие одинаковое количество протонов, но различное число нейтронов называются изотопами.

Согласно современной точке зрения, протоны и нейтроны в свою очередь состоят из еще более мелких частиц с дробным зарядом и спином  $1/2$  - кварков. Кварки являются точечными частицами вплоть до масштаба примерно  $0,5 \cdot 10^{-19}$  м, что примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона. Из кварков состоят протон и нейтрон. В настоящее время известно 6 разных «сортов» (чаще говорят - «ароматов») кварков: нижний ( $-1/3$ ); верхний ( $+2/3$ ); странный ( $-1/3$ ); очарованный ( $+2/3$ ); прелестный ( $-1/3$ ); истинный ( $+2/3$ ). Каждому кварку соответствует антикварк, обладающий противоположным электрическим зарядом. Некоторые физики полагают, что кварки состоят из еще более фундаментальных объектов, которым разные авторы присвоили имена ришонов, преонов или гаплонов.

Многие физики полагают, что электроны и кварки являются подлинно элементарными частицами, в том смысле, как это понимали древние греки. Они, по-видимому, не обладают внутренней структурой, и из них построены все известные формы обычной материи. Очевидно, что материя имеет иерархическую структуру. Из кварков состоят протоны и нейтроны, которые в свою очередь формируют ядра атомов. Атомы комбинируются в молекулы или кристаллы. Из этих основных "материалов" состоят твердые тела, окружающие нас. Двигаясь вверх по шкале масштабов, можно перейти к планетным системам, звездным скоплениям и, наконец, к галактикам, но даже галактики объединяются в скопления и сверхгалактики. Люди находятся где-то в середине этой иерархии.

Хотя протоны и нейтроны называются ядерными частицами, или нуклонами (нуклеус - ядро), но объединение этих двойного рода частиц отнюдь не формальное или, так ска-

зять, топографическое. Внутри ядра протоны и нейтроны постоянно обмениваются зарядами (поглощают или испускают мезоны), превращаясь один в другой. *Протоны и нейтроны фактически представляют различные состояния одной и той же ядерной частицы- нуклона, другими словами, нуклоны - родственные частицы, находящиеся в заряженном или нейтральном состоянии.* В ядрах легких элементов число протонов и число нейтронов относятся друг к другу как 1/1. Но, начиная с 21-го элемента (скандия) число нейтронов начинает преобладать, и у тяжелых элементов достигает значительной разницы, так что указанное соотношение составляет уже 1/1,6.

Вопросы для самоконтроля.

1. Из каких основных частиц состоит ядро атома?
2. По какому признаку элементарные частицы обычно подразделяют на четыре класса?
3. Характеристика фотонов (квантов электромагнитного поля).
4. Характеристика лептонов.
5. Характеристика мезонов.
6. Характеристика барионов.
7. Характеристика нейтрона.
8. Характеристика протона.
9. Понятие о кварках и иерархической структуре материи.

### 1.4.2. Характеристика ядерных сил

Казалось бы, что, согласно закону Кулона, одноименно заряженные протоны, отталкиваясь друг от друга, должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов очень прочные образования. Следо-

вательно, внутри ядра должны действовать большие силы сцепления как между протонами и нейтронами, так и между одноименными частицами. Огромная энергия связи нуклонов в ядре указывает на то, что это взаимодействие очень интенсивное. Это взаимодействие между нуклонами в ядре носит характер притяжения. Оно удерживает нуклоны на расстояниях  $\sim 10^{-13}$  см друг от друга, несмотря на сильное кулоновское отталкивание между протонами. Ядерное взаимодействие между нуклонами получило название сильного взаимодействия. Отличительные особенности этих сил следующие:

1. *Ядерные силы являются короткодействующими.* Их радиус действия имеет порядок  $10^{-13}$  см. На расстояниях, существенно меньших  $10^{-13}$  см, притяжение нуклонов сменяется отталкиванием.

2. Сильное взаимодействие не зависит от заряда нуклонов. Ядерные силы, действующие между двумя протонами, протоном и нейтроном и двумя нейтронами, имеют одинаковую величину. Это свойство называется *зарядовой независимостью* ядерных сил.

3. *Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов.* Так, например, нейтрон и протон удерживаются вместе, образуя ядро тяжелого водорода дейтрон (или дейтон) только в том случае, если их спины параллельны друг другу.

4. *Ядерные силы не являются центральными.* Их нельзя представлять направленными вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

5. *Ядерные силы обладают свойством насыщения* (это означает, что каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов). Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим отчасти объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное количество протонов и нейтронов.



По современным представлениям ядерное (сильное) взаимодействие обусловлено тем, что нуклоны виртуально обмениваются частицами, получившими название мезонов. Взаимодействие между заряженными частицами осуществляется через электромагнитное поле. Известно, что это поле может быть представлено как совокупность фотонов. Согласно представлениям квантовой электродинамики процесс взаимодействия между двумя заряженными частицами, например электронами, заключается в обмене фотонами. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения ею одного из фотонов, испущенных первой частицей. Такое описание взаимодействия нельзя понимать буквально. Фотоны, посредством которых осуществляется взаимодействие, являются не обычными реальными фотонами, а виртуальными. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования.

В 1935 г. японский физик Х.Юкава высказал смелую гипотезу о том, что в природе существуют пока не обнаруженные частицы с массой, в 200 - 300 раз большей массы электрона, и что эти-то частицы и исполняют роль переносчиков ядерного взаимодействия, подобно тому, как фотоны являются переносчиками электромагнитного взаимодействия. Юкава назвал эти гипотетические частицы тяжелыми фотонами. В связи с тем, что по величине массы эти частицы занимают промежуточное положение между электронами и нуклонами, они впоследствии были названы мезонами (греческое "мезос" означает средний).

Только в 1947 г. Оккиалини и Поуэлл открыли в космическом излучении так называемые  $\pi$ -мезоны, или пионы, которые оказались носителями ядерных сил, предсказанными за 12 лет до того Юкавой.

Существуют положительный ( $\pi^+$ ), отрицательный ( $\pi^-$ ), и нейтральный ( $\pi^0$ ) мезоны. Заряд  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов равен элементарному заряду электрона. Масса заряженных пионов одинакова и равна  $273m_e$  (140 МэВ), масса  $\pi^0$ -мезона равна  $264m_e$  (135 МэВ). Спин как заряженных, так и нейтрального  $\pi$ -мезона равен нулю ( $s = 0$ ). Все три частицы нестабильны. Время жизни  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов составляет  $2,60 \cdot 10^{-8}$  с,  $\pi^0$ -мезона -  $0,8 \cdot 10^{-16}$  сек. В результате виртуальных процессов нуклон оказывается окруженным облаком виртуальных  $\pi$ -мезонов, образующих поле ядерных сил. Поглощение этих мезонов другим нуклоном приводит к сильному взаимодействию между нуклонами. Например, протон испускает виртуальный  $\pi^+$ -мезон, превращаясь в нейтрон. Мезон поглощается нейтроном, который вследствие этого превращается в протон. Затем такой же процесс протекает в обратном направлении. Каждый из взаимодействующих нуклонов часть времени проводит в заряженном состоянии, а часть - в нейтральном.

Этот процесс находит экспериментальное подтверждение в рассеянии нейтронов на протонах. При прохождении пучка нейтронов через водород в этом пучке появляются

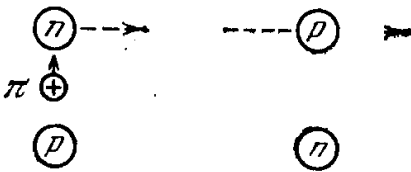


Рис. 4. Схема рассеяния нейтронов на протонах [43].

ся протоны, многие из которых имеют ту же энергию и направление движения, что и падающие нейтроны. Соответствующее число практически покоя-

щихся нейтронов обнаруживается в мишени. Следовательно, часть нейтронов, пролетая вблизи протонов, захватывает один из виртуальных  $\pi^+$ -мезонов. В результате нейтрон превращается в протон, а потерявший свой заряд протон превращается в нейтрон (рис. 4)

Вопросы для самоконтроля.

1. Как называется ядерное взаимодействие между нуклонами в ядре ?
2. В чём заключается свойство ядерных сил «короткодействующие»?
3. В чём заключается свойство ядерных сил «зарядовая независимость»?
4. В чём заключается свойство ядерных сил «взаимная ориентация спинов нуклонов»?
5. В чём заключается свойство ядерных сил «нецентральность»?
6. В чём заключается свойство ядерных сил «насыщение»?

### 1.4.3. Энергия связи ядра

Ядерные силы, обеспечивающие связь нуклонов ядра друг с другом - самые мощные силы природы. Установлено, что масса ядра всегда меньше суммы масс входящих в него отдельных частиц. Это обусловлено тем, что *при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом, то есть часть массы ядерных частиц превращается в энергию связи.*

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, надо затратить определенную энергию. Эта энергия и называется энергией связи ядра. При образовании ядра из нуклонов выделяется энергия связи. Если, например, рассчитать массу ядра атома гелия по формуле:  $m_{\text{я}} = m_{\text{p}} \cdot N_{\text{p}} + m_{\text{n}} \cdot N_{\text{n}}$ , где  $m_{\text{я}}$  - масса ядра,  $m_{\text{p}}$  - масса протона,  $N_{\text{p}}$  - количество протонов,  $m_{\text{n}}$  - масса нейтрона,  $N_{\text{n}}$  - количество нейтронов, то она будет равна:  $m_{\text{я}} = 1,0076 \cdot 2 + 1,0089 \cdot 2 = 4,033$  а.е.м. На самом же деле (фактически) масса ядра гелия равна 4,003 а.е.м.. Таким

образом, масса ядра гелия оказывается меньше массы своих составных частей, взятых в отдельности, на величину 0,03 а.е.м., то есть, ядро имеет недостаток массы. Разница между массой ядра расчетной и массой ядра фактической называется дефектом массы ( $\Delta m$ ).

$$\Delta m = m_{\text{я расчетная}} - m_{\text{я фактическая}}.$$

Таким образом, *энергией связи ядра называют энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны без сообщения им кинетической энергии.* При этом масса ядра, которое распалось на отдельные нуклоны, всегда оказывается меньше суммы масс этих нуклонов. Разница между массой ядра и суммарной массой нуклонов, на которые оно распалось, называется дефектом массы атомного ядра.

*Дефект массы показывает, насколько прочно связаны частицы в ядре, а также, сколько выделилось энергии при образовании ядра из отдельных нуклонов.* Этот расчет можно провести на основании уравнения взаимосвязи между массой и энергией, разработанного А.Эйнштейном:  $E = m \cdot c^2$ , где  $E$  - энергия в эргах;  $m$  - масса в г;  $c$  - скорость света, равная  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек. В соответствии с этим законом масса и энергия представляют собой разные формы одного и того же явления. Ни масса, ни энергия не исчезают, а при соответствующих условиях переходят из одного вида в другой, то есть, любому изменению массы ( $\Delta m$ ) системы соответствует эквивалентное изменение ее энергии:

$$\Delta m = \Delta E = \Delta m \cdot c^2.$$

Используя это уравнение, можно подсчитать энергию, которая выделится при образовании ядра гелия из отдельных нуклонов:  $\Delta E = 0,03 \cdot 1,6 \cdot 10^{-24} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 4,5 \cdot 10^{-5}$  эрг.

Так как, в ядерной физике за единицу энергии принят электронвольт, энергию связи ядра можно выразить в электронвольтах, исходя из того, что 1 а.е.м. эквивалентна 931 МэВ:  $\Delta E = 0,03 \cdot 931 = 27,93$  МэВ  $\sim 28$  МэВ.

Эта величина и есть энергия связи нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

Таким образом, если бы существовал способ деления ядра атома гелия на 2 протона и 2 нейтрона, для этого потребовалось бы затратить не менее 28 МэВ энергии. Энергия связи ядер соразмерно возрастает с увеличением числа нуклонов, однако не строго пропорционально их числу. Например, энергия ядра дейтерия составляет 2,2 МэВ, азота - 104,56, а урана - 1800 МэВ.

Для характеристики прочности ядра используется величина, которая называется удельной энергией связи. *Удельная энергия связи равна энергии связи ядра, приходящейся на один нуклон.* На рис. 5 изображен график, показывающий зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа элемента. Для гелия удельная энергия связи составляет:  $28/4 = 7$  МэВ.

Энергия связи действует лишь на короткие расстояния, примерно на  $1,4 \cdot 10^{-13}$  см, то есть не более двух радиусов нуклона. Следовательно, она связывает лишь соседние друг с другом нуклоны. Поэтому прибавление каждого нового нуклона в легком ядре увеличивает энергию связи. Ведь при этом каждый из немногочисленных нуклонов испытывает на себе энергию связи остальных нуклонов.

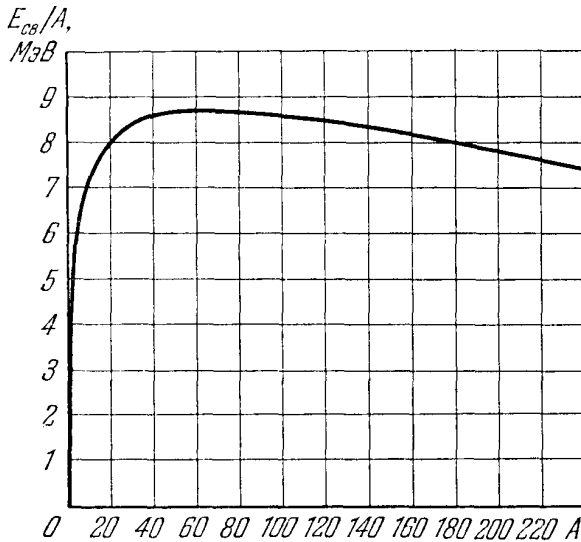


Рис. 5. Зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа элемента [43].

Наиболее плотно нуклоны укладываются только в фигуру шара, но для этого уже требуется большое число нуклонов. Действительно, наиболее плотно упакованы нуклоны элементов, занимающих середину таблицы Д. И. Менделеева. Однако когда число нуклонов достигает 60, то прибавление нового нуклона уже не дает увеличения энергии связи для каждого другого нуклона ввиду того, что многие из них уже расположены за пределами досягаемости энергии связи всех остальных нуклонов. По мере увеличения числа протонов, начинают сказываться кулоновские силы, так как они, суммируясь, действуют на все протоны и как бы разрыхляют тяжелое ядро. На преодоление их затрачивается некоторая доля энергии связи. Поэтому ядра тяжелых элементов менее стабильны, чем другие, и энергия связи их меньше.

Ядра со значениями массового числа от 50 до 60 (элементов от  $\text{Sr}$  до  $\text{Zn}$ ) являются энергетически наиболее выгодными, их нуклоны связаны в ядре сильнее. Энергия связи

для этих ядер достигает 8,7 МэВ/нуклон. С ростом массового числа удельная энергия связи постепенно уменьшается; для самого тяжелого природного элемента - урана - она составляет 7,5 МэВ/нуклон. Для сравнения: - химическая энергия связи атомов в молекулах в расчете на один атом равна нескольким электронвольтам (2 - 5 эВ). Именно этим объясняется, что ядерные реакции характеризуются в миллион раз большими энергиями, чем обычные химические реакции.

Таким образом, закон взаимосвязи массы и энергии показывает, откуда возникает та колоссальная энергия, которая выделяется при синтезе и делении ядер. Чем меньше удельная энергия связи, тем менее прочным является ядро. Элементы конца таблицы Менделеева имеют малую энергию связи, поэтому они неустойчивы и стремятся перестроиться. Они самопроизвольно преобразуются (распадаются) с образованием новых элементов.

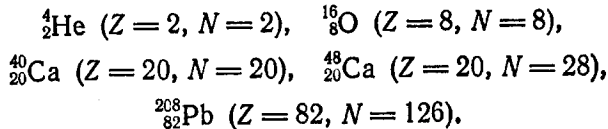
Вопросы для самоконтроля.

1. Из чего образуется «энергия связи» нуклонов друг с другом?
2. Что называется дефектом массы атомного ядра?
3. Что называется энергией связи нуклонов в ядре?
4. Что называется удельной энергией связи нуклонов в ядре?
5. На каком расстоянии действует энергия связи нуклонов в ядре?
6. В какую фигуру наиболее плотно укладываются нуклоны в ядре?
7. С какими значениями массовых чисел ядра являются энергетически наиболее выгодными?
8. Какая зависимость существует между удельной энергией связи, и прочностью ядра?

## 2.1. Явление радиоактивности

Природные изотопы элементов подразделяются на две категории - устойчивые (стабильные) и неустойчивые (радиоактивные). Условность такого деления состоит в том, что, в сущности, все ядра подвергаются внутриядерным преобразованиям (радиоактивному распаду), но с различной скоростью. Стабильными называют ядра, распадающиеся достаточно медленно. Понятие же медленности зависит от конкретно поставленной задачи. Обычно ядра принято считать стабильными, если со времени образования видимой части Вселенной (порядка  $10^{10}$  лет), то есть со времени образования химических элементов, распалась ничтожная часть их. Ядра, распадающиеся более быстро, считаются радиоактивными.

В ядрах устойчивых (стабильных) изотопов соотношение протонов и нейтронов энергетически наиболее благоприятное. Поэтому такие ядра неопределенно долгий срок сохраняют неизменное строение. В соответствии с опытом особо устойчивыми оказываются ядра, у которых число протонов, либо число нейтронов (либо оба эти числа) равно 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Эти числа получили название магических. Ядра, у которых число протонов ( $Z$ ) или число нейтронов ( $N$ ) является магическим (т. е. особо устойчивые ядра), также называются магическими. Ядра, у которых магическими являются и  $Z$ , и  $N$ , называются дважды магическими. Дважды магических ядер известно всего пять:



Эти ядра особенно устойчивы. В частности, особенная устойчивость ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  проявляется в том, что это единственная составная частица, испускаемая тяжелыми ядрами при радиоактивном распаде (она называется  $\alpha$ -частицей).



В ядрах неустойчивых изотопов, как, например, в ядрах тяжелых элементов (начиная от  $Bi$  и дальше), где численно резко преобладают нейтроны, внутриядерных сил для "цементирования" нуклонов уже не хватает. Такие ядра рано или поздно самопроизвольно превращаются в ядра других элементов. Превращение сопровождается испусканием ядрами частиц, выделением энергии и изменением атомного номера. При этом ядро энергетически упрочивается, хотя в некоторых случаях это состояние достигается не сразу, а через два или больше последовательных акта перестроек ядра. Данное свойство атомов и составляет их радиоактивность, а неустойчивые изотопы, подверженные радиоактивному распаду, называют радиоизотопами.

Таким образом, *радиоактивность - это свойство ядер определенных элементов самопроизвольно, без каких-либо внешних воздействий, превращаться в ядра других элементов с испусканием корпускулярного или электромагнитного излучения, которое называют радиоактивным излучением.* Такие превращения претерпевают только нестабильные ядра. Само явление называется радиоактивным распадом. Радиоактивность является исключительно свойством атомного ядра и зависит только от его внутреннего состояния. Радиоактивный распад нельзя ни прекратить, ни усилить. На скорость течения радиоактивных превращений не оказывают никакого воздействия изменения температуры и давления, наличие электрического и магнитного полей, вид химического соединения данного радиоактивного элемента и его агрегатное состояние.

Термин "радиоактивность" был введен в науку в 1898 году Марией Склодовской-Кюри. Этот термин оказался очень удачен. По физической сущности он отражает явление природы - свойство, способность ядер атомов химических элементов при их распаде испускать частицы высокой энергии. То есть излучение или радиацию. Не следует путать два различных физических понятия: радиоактивность и радиа-

ция. Радиоактивность - это явление распада атомных ядер, сопровождающееся испусканием частиц - излучений. Ядра атомов всех химических элементов обладают той или иной степенью неустойчивости, а, следовательно, и радиоактивности. Самой высокой устойчивостью обладает ядро атома легкого изотопа водорода (протия) - протон. Период полураспада протона, по теоретическим оценкам, составляет  $10^{31}$  лет.

*Радиация - синоним термина излучение - поток микро-частиц (элементарных частиц, ионов атомов и молекул).* Такие потоки частиц могут возникать, например, при радиоактивном распаде ядер атомов (ядерное излучение). Радиация может генерироваться искусственно с помощью ускорителей заряженных частиц (электронов, протонов, ядер атомов других химических элементов).

Вопросы для самоконтроля.

1. По какому признаку природные изотопы элементов подразделяются на устойчивые (стабильные) и неустойчивые (радиоактивные)?
2. Магические и дважды магические ядра.
3. Дать определение радиоактивности.
4. Дать определение радиоактивного распада.
5. Дать определение радиации.

## **2.2. Естественные и искусственные радиоактивные вещества**

Радиоактивность, наблюдающаяся у ядер, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность ядер, полученных посредством ядерных реакций, называется искусственной. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального раз-

личия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одинаковым законам.

Некоторые элементы в природе встречаются как в виде стабильных, так и радиоактивных изотопов, а у элементов, начиная от № 83, все изотопы радиоактивны. Стабильные и радиоактивные изотопы каждого элемента по физическим и химическим свойствам почти не отличаются друг от друга. Исключение составляют лишь изотопы водорода. Природная смесь водорода состоит из трех изотопов - легкого ( $^1\text{H}$ ), тяжелого ( $^2\text{H}$ , или D) и сверхтяжелого ( $^3\text{H}$ , или T). Первые два стабильны, но последний радиоактивен.  $^1\text{H}$  или протий, составляет 99,985% всего водорода, а  $^2\text{H}$ , или дейтерий, - 0,0149%. Свойства дейтерия несколько иные, чем протия. Так, например, вода, в молекулу которой вместо протия входит дейтерий (тяжелая вода), имеет удельный вес 1,108, точку замерзания  $+3,8^\circ$ , а точку кипения  $+101,4^\circ$  и в чистом виде обладает сильным биологическим действием - в ней не прорастают семена, и гибнет рыба. В  $1\text{м}^3$  обыкновенной воды в среднем содержится около 40 г тяжелой воды. Тритий ( $^3\text{H}$ ) составляет ничтожную часть ( $10^{-18}$ ) природного водорода.

Термин "изотоп" применим для обозначения разновидностей одного и того же элемента. *Атомы, принадлежащие различным элементам, то есть отличающиеся друг от друга не только массовым числом, но и атомным номером, называются нуклидами, а если они радиоактивны, - радионуклидами.*

Нуклиды разных элементов, имеющие одинаковое массовое число называют изобарами (например,  $^{14}\text{C}$  и  $^{14}\text{N}$ ). Нуклиды с равным нейтронным числом, но разным атомным номером называют изотонами (например, в ядре  $^{39}\text{K}$  и  $^{40}\text{Ca}$  содержится по 20 нейтронов).

Стабильный изотоп не имеет избытка энергии и находится в так называемом основном состоянии. Изомер с избытком энергии находится в метастабильном состоянии,

символически обозначаемом латинской *m*, поставленной рядом с массовым числом, например,  $^{137}m\text{Ba}$ . *Одноименные изотопы с одинаковым массовым числом, но в разном энергетическом состоянии называют изомерами.* После отдачи излишка энергии метастабильный изомер переходит в основное состояние (изомерный переход).

Исходный радионуклид, испытывающий распад, называют материнским, продукт распада (стабильный или радиоактивный) - дочерним. В том случае, если продукт распада стабильный, дочерний радионуклид называют конечным.

Радиоактивные элементы распространены в природе в ничтожных количествах. Они содержатся в твердых породах земной коры, в воде, воздухе, а также в растительных и животных организмах, в которые они попадают из окружающей среды (приложение, табл. 8, 9).

В земной коре естественно-радиоактивные элементы имеются преимущественно в урановых рудах, и почти все они являются изотопами тяжелых элементов с атомным номером более 83. Неустойчивые ядра тяжелых элементов претерпевают в ряде случаев многократные последовательные ядерные превращения. В результате возникает целая цепочка радиоактивных распадов, в которой изотопы оказываются генетически связанными между собой. Такая цепочка - *совокупность всех изотопов ряда элементов, возникающих в результате последовательных радиоактивных превращений из одного материнского элемента, называется радиоактивным семейством, или рядом.* Семейства названы по первым элементам, с которых начинаются радиоактивные превращения, по их родоначальникам. В настоящее время известно три естественно-радиоактивных семейства: урана-радия, тория и актиния. Эти родоначальные элементы в результате 10 - 14 последовательных радиоактивных перестроек превращаются в стабильный изотоп свинца. Причина, по которой периодическая система хими-

ческих элементов, встречающихся в природе в естественном состоянии, обрывается на уране, заключается в происхождении химических элементов и их последующих радиоактивных превращениях. В настоящее время можно считать доказанным, что все химические элементы Солнечной системы образовались свыше 5 млрд. лет назад в результате гравитационного сжатия огромных масс галактического водорода, при котором сильно повысилась его температура. Чрезвычайно высокая температура и обеспечила синтез сложных ядер из более простых ядер водорода. При этом были синтезированы и многочисленные изотопы химических элементов с атомными номерами больше 92. Однако период их полураспада оказался значительно меньше времени существования Земли (около  $4,5 \cdot 10^9$  лет). К настоящему времени все эти изотопы из-за радиоактивных превращений полностью распались и исчезли на Земле. Самым тяжелым из сохранившихся оказался изотоп урана  $^{238}\text{U}$ , период полураспада которого ( $4,5 \cdot 10^9$  лет), того же порядка, что и возраст Земли.

Радиоактивное излучение невидимо. Оно обнаруживается с помощью различных явлений, происходящих при его действии на вещество (свечение люминофоров или флуоресцирующих экранов, ионизация вещества, почернение фотоэмульсии после проявления).

Когда в конце 90-х годов прошлого столетия были открыты первые природные радионуклиды, то при изучении испускаемого ими излучения выяснилось, что магнитное и электрическое поле расщепляло этот поток на три отдельных пучка. Неизвестные пучки излучения радиоактивного препарата условно назвали альфа-, бета- и гамма-лучами (рис. 6).

Альфа-лучи в электрическом поле слегка отклонялись к отрицательному полюсу и, следовательно, это были сравнительно тяжелые частицы, заряженные положительно. Бета-лучи более круто склонялись к положительному полюсу и,

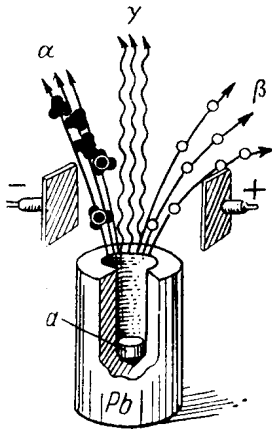
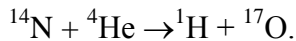


Рис. 6. Поведение альфа-, бета- и гамма-излучений в электрическом поле.

следовательно, представляли собой легкие частицы, заряженные отрицательно. Не отклонялись только гамма-лучи, а уже тогда было известно, что истинные лучи даже в сильном электрическом или магнитном поле не отклоняются. Таким образом, оказалось, что только гамма-лучи и представляют собой истинные лучи, тогда как альфа- и бета-лучи являются частицами, то есть веществом. Позже выяснилось, что альфа-частицы -

это ядра гелия, а бета-частицы - электроны.

Радиоактивный распад шел самопроизвольно, и казалось, искусственно его вызвать нельзя. Однако Э.Резерфорд в 1919 году, обстреливая азот альфа-частицами, испускаемыми при распаде полония, получил устойчивый изотоп кислорода. Альфа-частица сливалась с ядром азота, а возникшее при этом сложное ядро немедленно испускало протон и превращалось в устойчивый изотоп кислорода по реакции:



15 лет спустя, в 1934 году супруги Фредерик и Ирэн Жолио-Кюри, обстреливая стабильный изотоп алюминия теми же альфа-частицами, произвели другую ядерную реакцию с вы-

ходом радиофосфора  $^{30}\text{P}$ и вылетом свободного нейтрона:  $^{27}\text{Al} + ^4\text{He} \rightarrow ^1_0\text{n} + ^{30}\text{P}$ . Получающийся изотоп фосфора радиоактивен и после распада превращается в кремний. Этими опытами была открыта возможность получения искусственных радионуклидов. В настоящее время для обстрела изотопов пользуются не только альфа-частицами и нейтронами, но и протонами и дейтронами. Такие "снаряды" при обстреле должны иметь большую скорость полета, что и достигается на особых машинах - ускорителях частиц, циклотронах и синхрофазотронах. Физиками искусственно изготовлено более тысячи различных радионуклидов, в том числе 11заурановых (трансурановых) элементов.

Вопросы для самоконтроля.

1. В чём различие между естественной и искусственной радиоактивностью?
2. Различаются ли стабильные и радиоактивные изотопы по физическим и химическим свойствам?
3. Что называют изобарами и изомерами?
4. Что называют материнским и дочерним ядром?
5. Что называют радиоактивным семейством, или рядом?
6. В результате чего появились естественные радиоактивные изотопы с атомными номерами больше 92?
7. Чем отличаются альфа и бета лучи?
8. Кто, когда и как впервые осуществил искусственное преобразование ядра?

### 2.3. Единицы радиоактивности

Хотя радионуклиды после особой очистки можно получить в чистом виде или почти в чистом виде, но, практически, они всегда находятся в смеси с различными нерадиоактивными веществами, или носителями и, как правило, в ко-

личестве, зачастую не поддающемуся весовому определению ("невесомое" количество). Поэтому о количестве радионуклида судят не по его весу, выраженному в граммах, а по его активности. *Активность радиоактивного образца (препарата) определяется числом распадов в единицу времени.* Чем в большем числе радиоактивных атомов данного препарата происходит ядерных превращения в секунду, тем больше его активность. Так как скорость распада у разных радионуклидов различна, то одинаковые количества различных радионуклидов обычно имеют различную активность. Например, если взять радионуклиды  $^{238}\text{U}$ ,  $^{32}\text{P}$  и  $^8\text{Li}$  одинаковой массы, то в связи с различными периодами полураспада ( $4,5 \cdot 10^9$  лет, 14,3 дня и 0,89 секунд соответственно), самая высокая активность будет у лития и фосфора и очень малая у урана, так как наибольшее количество распадов в 1 секунду будет у первых двух изотопов. С другой стороны, 3 тонны  $^{238}\text{U}$ , 1 грамм  $^{226}\text{Ra}$  и 1 микрограмм  $^{131}\text{I}$  обладают примерно одинаковой активностью. Активность радионуклида пропорциональна его количеству, она зависит от скорости распада и со временем уменьшается. Единицу измерения активности (в системе СИ) назвали беккерелем (Бк) в честь ученого, открывшего явление радиоактивности; один беккерель равен одному распаду в секунду (расп/с).

*Один Беккерель (Бк), это активность такого количества радиоактивного вещества, в котором за 1 секунду происходит 1 распад.* Часто употребляется внесистемная международная единица - кюри (Ки). Кюри - это такое количество любого радиоактивного вещества, в котором число радиоактивных распадов в секунду равно  $3,7 \cdot 10^{10}$ . Единица кюри соответствует радиоактивности 1 г радия. В одном грамме радия содержится  $2,7 \cdot 10^{21}$  ядер радия, и каждую секунду из них распадается  $3,7 \cdot 10^{10}$  ядер. Именно это число радиоактивных распадов в секунду условились принять за



единицу радиоактивности и назвали ее кюри - в память о выдающемся вкладе семьи Кюри в науку о радиоактивности. Первоначально считали, что в 1 г чистого металлического радия (без примесей дочерних продуктов) в 1 секунду происходит именно 37 млрд. распадов. Впоследствии была установлена истинная цифра-  $3,611 \cdot 10^{10}$  расп/сек. Однако, поскольку единица кюри уже прочно вошла в употребление, то ее значение было оставлено прежним. Кюри очень большая величина, поэтому обычно употребляют дробные единицы:  $1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}$ ;  $1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки}$ ;  $1 \text{ нКи} = 10^{-9} \text{ Ки}$ .

Радиоактивные вещества характеризуются величиной удельной активности или концентрацией, то есть активностью, приходящейся на единицу массы (или объема). Единицами удельной активности являются Ки/л, Ки/кг, Бк/л, Бк/кг и их производные. Активность, приходящуюся на единицу площади, называют поверхностной удельной активностью (Бк/м<sup>2</sup>, Ки/км<sup>2</sup>).

Единицы беккерель и кюри применяются для измерения активности альфа- и бета-активных веществ. Для измерения активности гамма-излучателей употребляется единица, называемаяся грамм-эквивалентом (г-экв.). Это интенсивность гамма-излучения, испускаемого любым радиоактивным веществом, эквивалентная  $\gamma$ -излучению, испускаемому 1 граммом радия.

Вопросы для самоконтроля.

1. Как определяется активность радиоактивного образца?
2. Что означает активность радиоактивного вещества один Беккерель (Бк)?
3. Что означает активность радиоактивного вещества один Кюри (Ки)?
4. Что означает «удельная» активность радиоактивного вещества?

## 2.4 Закон радиоактивного распада

Перестройка нестабильных ядер (радиоактивный распад) совершается под действием внутриядерных процессов. Его темп и характер не зависят от количества радиоактивного вещества и не изменяются от обычных внешних воздействий. Но не все ядра распадаются одновременно.

Время и место распада радиоактивных ядер определяется законами случая. Ядро - это микрообъект, подчиняющийся законам квантовой механики, поэтому при его описании понятие вероятности является основным. Можно достоверно предсказать среднее время жизни ядра и сколько в среднем ядер из большого их числа распадется в секунду. Но момент распада каждого отдельного ядра предсказать нельзя. Например, среднее время жизни ядра радия-226 = 2300 лет, но это совсем не означает, что ядро радия, которое только что образовалось при распаде тория-230, проживет именно столько, с равной вероятностью оно может распасться и в следующую секунду, и через миллион лет. Радиоактивные ядра не стареют и вероятность их распада не зависит от времени, которое они "прожили" к моменту распада. *Про каждое отдельно взятое ядро нельзя сказать, когда оно распадется- через секунду или через 100 лет. Однако среди большого числа ядер в каждую секунду распадается в среднем какая-то определенная доля их, и рано или поздно каждый атом радионуклида претерпевает превращение.* Поэтому говорят, что распад любого радионуклида подчиняется статистическим закономерностям, что этот процесс носит вероятностный характер и может быть математически определен и охарактеризован для большого числа радиоактивных атомов. Особенность радиоактивного распада состоит в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время.

Иными словами, распад ядер происходит неравномерно то большими, то меньшими порциями.

Скорость распада можно выразить взаимосвязанными величинами: периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) и постоянной распада ( $\lambda$ ). *Периодом полураспада называется промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа атомов данного радионуклида, наполовину уменьшается его начальная активность.* Независимо от количества радионуклида число его атомов в течение одного периода полураспада убывает на половину. Чем короче период полураспада, тем быстрее идет распад, то есть  $T_{1/2}$  обратно пропорционален скорости распада. Величина периода полураспада для каждого радионуклида строго специфична и указывается в специальных таблицах. Для различных радиоактивных изотопов период полураспада имеет значения от долей секунды до миллиардов лет. Причем у одного и того же элемента могут быть изотопы с различными периодами полураспада. Соответственно и радиоактивные элементы разделяются на короткоживущие (часы, дни) и долгоживущие (годы). Многие природные радионуклиды обладают громадным периодом полураспада (тысячи, миллионы и даже миллиарды лет). Это "долгоживущие" или долговечные радионуклиды. Именно поэтому они и "дожили" до наших дней (возраст Земли предположительно равен  $4,5 \cdot 10^9$  лет). Большинство же искусственных радионуклидов, наоборот, "короткоживущие", и среди них относительно большой период полураспада имеют  $^{90}\text{Sr}$  (27,7 лет) и  $^{137}\text{Cs}$  (30 лет). Чем короче период полураспада радионуклида, тем выше его радиоактивность. Небольшое весовое количество короткоживущего радионуклида может иметь значительно более высокую активность, чем большое количество долгоживущего радионуклида или, другими словами, равные весовые количества разных по периоду полураспада радионуклидов имеют разную активность, как это показано в табл. 1.

Таблица 1.

Связь между периодом полураспада  $T_{1/2}$ , удельной активностью  $C$  и весом  $Q$  некоторых радионуклидов [10]

Радионуклид	$T_{1/2}$	$C$ (Ки /г)	$Q$ (г/ Ки)
$^{131}\text{I}$	8,08 дня	$1,23 \cdot 10^5$	$0,81 \cdot 10^{-5}$
$^{90}\text{Sr}$	27,7 лет	$1,45 \cdot 10^2$	$0,68 \cdot 10^{-3}$
$^{137}\text{Cs}$	30 лет	$9,82 \cdot 10$	$1,15 \cdot 10^{-2}$

Удельную активность  $C$  (кюри/г) любого радионуклида (без носителя или примесей) можно высчитать по формулам, где  $M$ - массовое число, а  $T_{1/2}$  - период полураспада:

$$C = 3,10 \cdot 10^9 / M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - часы);}$$

$$C = 1,30 \cdot 10^8 / M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - дни);}$$

$$C = 3,57 \cdot 10^5 / M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - годы).}$$

Вес радионуклида  $Q$ , активность которого равна 1Ки, высчитывают по формулам:

$$Q, = 3,2 \cdot 10^{-10} \cdot M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - часы);}$$

$$Q, = 7,7 \cdot 10^{-9} \cdot M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - дни);}$$

$$Q, = 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot T_{1/2} \text{ (} T_{1/2} \text{ - годы).}$$

*Постоянной (или константой) распада ( $\lambda$ ) называется доля радиоактивных атомов, распадающихся в 1 секунду. Она характеризует вероятность распада на один атом в единицу времени (секунду). Чем медленнее идет распад, тем меньше и постоянная распада. Она связана с периодом полураспада следующим уравнением:  $\lambda = 0,693 / T_{1/2}$ , следовательно,  $T_{1/2} = 0,693 / \lambda$ , где 0,693 - натуральный логарифм 2 ( $\ln 2$ ).*

Таким образом, чем больше период полураспада, тем меньше постоянная распада. Для каждого радиоактивного изотопа средняя скорость распада его атомов постоянна,

неизменна и характерна только для данного изотопа (табл. 2).

Таблица 2.

Скорость распада некоторых радионуклидов, выраженная периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) и постоянной распада ( $\lambda$ ) [10]

Радионуклид	$T_{1/2}$	$\lambda$ , сек. <sup>-1</sup>	Радионуклид	$T_{1/2}$	$\lambda$ , сек. <sup>-1</sup>
<sup>238</sup> U	4,5 · 10 <sup>9</sup> лет	4,38 · 10 <sup>-18</sup>	<sup>90</sup> Sr	27,7 года	7,83 · 10 <sup>-10</sup>
<sup>14</sup> C	5700 лет	3,92 · 10 <sup>-12</sup>	<sup>60</sup> Co	5,24 года	4,14 · 10 <sup>-9</sup>
<sup>226</sup> Ra	1622 года	1,36 · 10 <sup>-11</sup>	<sup>32</sup> P	14,3 дня	5,61 · 10 <sup>-7</sup>
<sup>137</sup> Cs	30 лет	7,32 · 10 <sup>-10</sup>	<sup>11</sup> C	20,4 минуты	5,63 · 10 <sup>-3</sup>

Постоянную распада выражают в обратных секундах (сек<sup>-1</sup>), чтобы показать, что с течением времени количество радиоактивных атомов не растет, а убывает. Величина, обратная постоянной распада ( $\tau = 1/\lambda$ ), называется средней продолжительностью жизни ядра.

*Закон радиоактивного распада: 1. Отдельные радиоактивные ядра претерпевают превращение независимо друг от друга. 2. Число нераспавшихся ядер любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада (превращения ядер) по экспоненте. 3. За единицу времени распадается всегда одна и та же доля имеющихся в наличии ядер.*

Закон радиоактивного распада можно выразить графически и математически. Графически закон радиоактивного распада выражается показательной (экспоненциальной) кривой (рис. 7), где по горизонтали отложены периоды полураспада, по вертикали - число нераспавшихся атомов, из которой видно, что с увеличением времени число нераспавшихся атомов убывает (за каждый  $T_{1/2}$  оно уменьшается в 2 раза), приближаясь к нулю.

Следовательно, после  $5 \cdot T_{1/2}$  количество атомов составит уже лишь 3 %, а за  $10 \cdot T_{1/2}$  - 0,1 % начального числа атомов, то есть практически все атомы подвергнутся распаду. Однако теоретически все атомы любого радионуклида до последнего никогда не распадутся.

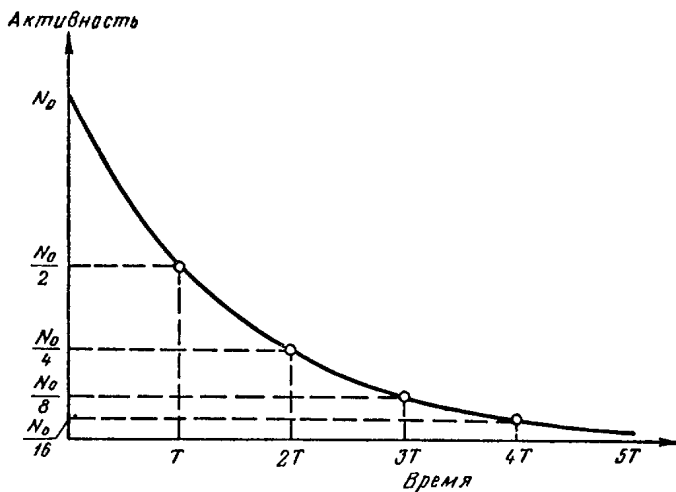


Рис. 7. Графическое изображение закона радиоактивного распада (кривая радиоактивного распада).

Математически закон радиоактивного распада выражается уравнением:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где  $N_t$  - количество радиоактивных ядер, оставшихся по прошествии времени  $t$ ;  $N_0$  - исходное количество радиоактивных ядер в начальный момент наблюдения ( $t = 0$ );  $e$  - основание натуральных логарифмов ( $e = 2,72$ );  $\lambda$  - постоянная радиоактивного распада;  $t$  - время, прошедшее от начального момента до данного момента и выраженное в тех же единицах времени, что и  $T_{1/2}$ .

Активность радиоактивного препарата ( $C$ ) в процессе распада ядер непрерывно уменьшается по закону, аналогич-

ному закону радиоактивного распада. По этой же формуле можно рассчитать, чему равна  $C_t$ , в данном случае - активность радионуклида в данный момент. Для того чтобы произвести обратное действие, то есть по активности, имеющейся в данный момент ( $C_t$ ), вычислить, чему она равнялась времени тому назад (т. е.  $C_0$ ), надо уравнение распада преобразовать и

$$\begin{aligned} &\text{вместо } C_t = C_0 \cdot e^{-\lambda t} \\ &\text{написать } C_0 = C_t \cdot e^{\lambda t}. \end{aligned}$$

В обоих случаях надо иметь в виду, что поскольку  $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ , то  $\lambda \cdot t = 0,693 \cdot t/T_{1/2}$ . Зная  $T_{1/2}$ , а так же; сначала вычисляют, чему равна  $\lambda \cdot t$ ; а затем  $e^{\lambda t}$  и  $e^{-\lambda t}$ . Значение величин  $e^x$  и  $e^{-x}$  (при  $x$  от 0 до 9,4) дано в специальных таблицах показательной функции. Но гораздо проще пользоваться таблицей поправочных коэффициентов (приложение, табл. 4), в которой по  $t/T_{1/2}$  находят соответствующий коэффициент (К).

Пример. Удельная активность препарата  $^{131}\text{J}$  на 10 мая была 2,2 мКи/мл. Какова будет его активность 16 мая? В условиях примера известна начальная активность ( $C_0$ ), а с 10 до 16 мая прошло 6 дней ( $t$ ). Таким образом, в уравнении  $C_t = C_0 \cdot e^{-\lambda t}$  известны уже две величины -  $C_0$  и  $t$ . Так как период полураспада ( $T_{1/2}$ )  $^{131}\text{J}$  равен 8 дням, то легко вычислить, чему равен показатель степени  $\lambda \cdot t$ . Поскольку  $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ , - то  $\lambda \cdot t = 0,693 \cdot t/T_{1/2}$  ( $T_{1/2}$  и  $t$  должны быть выражены в одинаковых единицах времени, в данном случае - в днях). В нашем примере  $\lambda \cdot t = 0,693 \cdot 6/8 = 0,52$ . Значение  $e^{-0,52}$  (по таблице показательных функций) равно 0,5945.  $C_0$  по условиям примера равно 2,2 мКи/мл. Поэтому 16 мая удельная активность препарата  $^{131}\text{J}$ : будет:  $C_t = 2,2 \text{ мКи/мл} \cdot 0,5945 = 1,307 \text{ мКи/мл}$ .

С поправочным коэффициентом К пример решается значительно проще. Для этого надо сначала вычислить, чему равно  $t/T_{1/2}$  и по таблице (приложение 4) найти соответствующий коэффициент. В нашем примере  $t/T_{1/2} = 0,75$ , а

ему соответствует коэффициент 1,68. Теперь для получения ответа  $C_0$  надо делить на 1,68, т. е.  $C_t = 2,2 \text{ мКи/мл} / 1,68 = 1,31 \text{ мКи/мл}$ .

Порядок вычисления не меняется, если активность была известна в распадах или импульсах в минуту. Если надо по активности на данный момент ( $N_t$ ) вычислить начальную активность ( $N_0$ ), то, установив, чему равно  $t/T_{1/2}$ , надо найти соответствующий ему коэффициент  $K$  и перемножить его с  $N_t$  (в данном примере он равен 1,31), т. е.  $1,68 \cdot 1,31$ . Произведение  $2,2 \text{ мКи/л}$  и составляет  $N_0$ .

Ядерные превращения подразделяются на две категории - радиоактивный распад и ядерные реакции. Радиоактивный распад совершается самопроизвольно и ему подвержены все природные и искусственные радионуклиды. Так как распад изменяет заряд исходного ядра, то дочерний атом по сравнению с материнским имеет иные физические и химические свойства. При распаде в атом извне ничего не приносится, а, наоборот, из ядра в окружающую среду вылетает частица или же электромагнитное излучение, либо то и другое вместе. Таким образом, радиоактивный распад сопровождается корпускулярным (альфа-частицы, бета-частицы) и электромагнитным излучением (гамма-лучи, рентгеновские лучи).

Под ядерными понимают такие реакции, среди исходных частиц которых, обязательно имеется, по крайней мере, одно ядро. Оно сталкивается с другим ядром или элементарной частицей, в результате чего происходит ядерная реакция и образуются новые частицы. Ядерные реакции можно вызвать искусственно.

Вопросы для самоконтроля.

1. Радиоактивные ядра одного и того же элемента распадаются все сразу или постепенно, в различное время?
2. Что называется периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) радиоактивного изотопа?



3. Что называется постоянной распада ( $\lambda$ ) радиоактивного изотопа?
4. Назовите период полураспада ( $T_{1/2}$ )  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .
5. Что называется средней продолжительностью жизни радиоактивного ядра?
6. Положения закона радиоактивного распада.
7. Графическое изображение закона радиоактивного распада (кривая радиоактивного распада).
8. В чём различие между радиоактивным распадом и ядерными реакциями?

## 2.5. Типы ядерных распадов

К числу радиоактивных процессов относятся  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад (электронный, позитронный распады и электронный захват),  $\gamma$ -излучение ядер (изомерный переход) и внутренняя конверсия, спонтанное деление тяжелых ядер, протонная радиоактивность.

Процессы радиоактивного распада сопровождаются превращением одних элементов таблицы Менделеева в другие. При этом выполняются законы сохранения зарядового и массового чисел: массовое (или зарядовое) число исходного элемента равно суммарному массовому (зарядовому) числу продуктов распада. Следствием этих законов является правило смещения, которое сформулировали в 1913 году Фаянс и Содди:

а) каждый акт альфа-распада сопровождается образованием нового элемента, массовое число которого на 4 меньше массового числа исходного элемента, а зарядовое число меньше на 2, поэтому новый элемент смещается относительно исходного на две клетки таблицы Менделеева к ее началу;

б) каждый акт бета-распада сопровождается образованием нового элемента, массовое число которого равно массовому числу исходного элемента, а зарядовое число на 1

больше зарядового числа исходного элемента, поэтому новый элемент смещается относительно исходного на одну клетку к концу таблицы Менделеева;

в) гамма-излучение не сопровождается образованием новых элементов.

Вопросы для самоконтроля.

1. Правило смещения Фаянса и Содди.
2. Чем сопровождается альфа-распад?
3. Чем сопровождается бета-распад?

### 2.5.1. Альфа-распад

Альфа-распад сопровождается испусканием из ядра неустойчивого элемента  $\alpha$ -частицы, представляющей собой ядро атома гелия. Масса этой частицы относительно велика и в абсолютном выражении составляет  $6,644 \cdot 10^{-24}$  г, то есть превышает массу электрона в 7300 раз. Альфа-распад - достаточно распространенное ядерное превращение тяжелых ядер, в настоящее время известно более 160 альфа-активных видов ядер. Ядра с порядковым номером больше 82 ( $Z=82$  для Rb), за редким исключением, альфа-активны.

В процессе  $\alpha$ -распада различают две стадии: образование частицы из двух протонов и двух нейтронов (в результате межнуклонного обмена пи-мезонами) и собственно испускание ядром этой частицы. Обособлению нуклонов в отдельную частицу способствует насыщение ядерных сил.

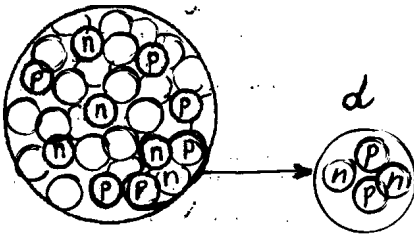


Рис. 8. Схема  $\alpha$ -распада.

Сформировавшаяся  $\alpha$ -частица меньше подвержена действию ядерных сил притяжения. Одновременно на  $\alpha$ -частицу больше, чем на отдельные протоны, действуют кулоновские силы отталкивания от ядра. Однако подобно тому,

как фотон не существует в готовом виде в недрах атома, и возникает лишь в момент излучения,  $\alpha$ -частица также возникает в момент радиоактивного распада ядра. Испускание ядром  $\alpha$ -частицы представляет собой квантомеханический туннельный эффект. Он состоит в просачивании, в проникновении  $\alpha$ -частицы, обладающей волновыми свойствами сквозь потенциальный барьер. Причем, чем больше энергия  $\alpha$ -частиц, тем выше вероятность туннельного эффекта и меньше время жизни радиоактивного ядра.

При вылете  $\alpha$ -частицы ядро теряет 2 протона и 2 нейтрона и превращается в другое ядро, в котором число протонов (заряд ядра) уменьшено на 2, а число частиц (массовое число) - на 4. Так как альфа-частица содержит два протона, то она несет два заряда положительного электричества. Следовательно, при радиоактивном распаде в соответствии с правилом смещения (сдвига), сформулированным Фаянсом и Содди, образующийся при альфа-распаде элемент (дочерний) смещен влево относительно исходного (материнского) на две клетки периодической системы Д.И.Менделеева. Схематично процесс  $\alpha$ -распада представлен на рис. 8.

Каждый акт альфа-распада сопровождается высвобождением энергии, причем основная часть ее выносится альфа-частицей. Кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц возникает за счет избытка энергии покоя материнского ядра над суммарной энергией покоя дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы. Эта избыточная энергия распределяется между  $\alpha$ -частицей и дочерним ядром в отношении, обратном пропорциональному их массам. Энергии (скорости)  $\alpha$ -частиц, испускаемых данным радиоактивным веществом, оказываются строго определенными. В тех случаях, когда  $\alpha$ -распад сопровождается гамма-излучением (как, например, при ступенчатом альфа-распаде  ${}^{234}\text{U}$  в  ${}^{230}\text{Th}$ , а затем в  ${}^{226}\text{Ra}$ ), высвобождающаяся энергия сначала тоже распределяется между альфа-частицей и до-

черным ядром (возбужденным), а последнее затем отдает избыток энергии с гамма-квантом. Энергия  $\alpha$ -частиц большинства альфа-источников лежит и в пределах 4 - 9 МэВ, хотя крайние значения шире. Альфа-частицы одних  $\alpha$ -излучателей имеют строго однозначную кинетическую энергию. Например, все  $\alpha$ -частицы, испускаемые  $^{236}\text{U}$ , имеют одинаковую энергию- 4,50 МэВ,  $\alpha$ -частицы  $^{221}\text{Ra}$  - 6,71 МэВ, а  $^{216}\text{At}$  - 7,79 МэВ. Радионуклиды с однозначной энергией частиц называют монохроматическими излучателями. Испускаемые ими частицы имеют равную дальность пробега (2-10 см в воздухе, до 50 мк в биологической ткани). Другие радионуклиды испускают частицы с двумя или более значениями энергии, причем каждый "сорт" частиц составляет строго определенную долю в излучении. Такие радионуклиды называют полихроматическими излучателями с линейчатым энергетическим спектром. Так, например,  $\alpha$ -излучение  $^{235}\text{U}$  состоит на 10 % из частиц с энергией в 4,57 МэВ, на 86 % с энергией 4,39 МэВ и на 4 % - 4,18 МэВ. Радий-223 испускает даже пять "сортов"  $\alpha$ -частиц.

Период полураспада ( $T_{1/2}$ ) у различных альфа-излучателей различен. Крайними примерами являются распад  $^{212}\text{Po}$  с  $T_{1/2}$  -  $0,3 \cdot 10^{-6}$  сек. и  $^{232}\text{Th}$  с  $T_{1/2}$  -  $1,39 \cdot 10^{10}$  лет. Чем больше энергия распада, тем короче период полураспада.

Вопросы для самоконтроля.

1. Из каких нуклонов состоят  $\alpha$ -частицы?
2. Что испускается из радиоактивного ядра при  $\alpha$ -распаде?
3. Чему равны масса, заряд и интервалы возможных энергий  $\alpha$ -частицы?
4. Какое место в таблице химических элементов Д.И. Менделеева занимает дочернее ядро после альфа-распада материнского ядра?
5. Указать интервалы периодов полураспада ( $T_{1/2}$ ) у различных альфа-излучателей.

6. Указать интервалы пробега в воздухе и в биологической ткани альфа частиц различных излучателей.

### 2.5.2. Бета-распад

Ряд естественных и искусственных радиоактивных элементов претерпевает распад с испусканием электрона, а потому зарядовое число ( $Z$ ), увеличивается на единицу. Некоторые искусственно-радиоактивные изотопы претерпевают распад с испусканием позитрона, и по этой причине его зарядовое число уменьшается на единицу. В некоторых случаях, называемых электронным захватом ( $e^-$ -захватом), ядро поглощает один из электронов внутренних оболочек (K, L, M), а потому зарядовое число уменьшается на единицу. Электроны и позитроны, испускаемые ядрами, называют  $\beta$ -частицами или бета-излучением, а сами ядра - бета-активными. Бета-распад это самопроизвольный процесс, в котором нестабильное ядро  ${}_Z^AX$  превращается в ядро - изобар  ${}_{Z+1}^AX$  или  ${}_{Z-1}^AX$ . Конечным результатом этого процесса яв-

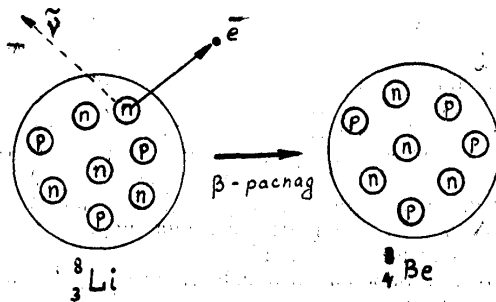


Рис. 9. Схема  $\beta$ -распада ядра лития с образованием ядра бериллия [3].

ляется превращение в ядре нейтрона в протон или протона в нейтрон. Этот тип распада более распространен, чем альфа-распад, ему подвержены ядра почти всех элементов периодической таблицы, вплоть до самых легких. Так, изотоп во-

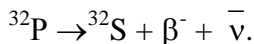
дорода - тритий, бета-активен. Этому типу ядерного распада подвержены почти все искусственные радионуклиды и такие природные радионуклиды, как  $^{14}\text{C}$  и  $^{40}\text{K}$ . В настоящее время известно более тысячи бета-активных изотопов. Период полураспада бета-излучателей лежит в широких пределах - от 0,03 секунды ( $^{12}\text{B}$ ) до  $6 \cdot 10^{14}$  лет ( $^{115}\text{In}$ ).

Вопросы для самоконтроля.

1. Типы  $\beta$ -распадов.
2. Что испускается из радиоактивного ядра при  $\beta$ -распаде?
3. Указать интервалы периодов полураспада ( $T_{1/2}$ ) у различных бета-излучателей.

*Электронный распад.*

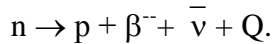
Нестабильное ядро с избыточным содержанием в нем нейтронов может перейти в устойчивое состояние за счет перехода более тяжелого нейтрона в более легкий протон с испусканием электрона и антинейтрино (рис. 9). При этом распадае заряд ядра и соответственно атомный номер элемента увеличиваются на единицу, дочерний элемент сдвигут в таблице Д.И.Менделеева на один номер вправо от исходного (сдвиг вправо), а массовое число (сумма нуклонов) остается без изменения. Массовые числа электрона и антинейтрино в этих схемах принимаются за нуль, так как они в тысячи раз меньше массовых чисел ядер. Поэтому исходный и дочерний продукты электронного распада, являясь разными элементами, имеют одинаковые массовые числа, то есть являются изобарами. Так, например, при электронном распаде тяжелый изотоп фосфора, выбросив электрон и антинейтрино, превращается в стабильный изотоп серы:



Ядро  $^{32}\text{P}$  состоит из 15 протонов и 17 нейтронов, то есть нейтроны содержатся в избытке. Один из них и превращается в протон.

В ядре конечного продукта оказывается 16 протонов и 16 нейтронов, то есть по-прежнему сохраняется 32 нуклона.

Бета-распад это не внутриядерный, а внутринуклонный процесс. Если в ядре имеется излишек нейтронов (нейтронная перегрузка ядра), то при определенных условиях нейтрон может превратиться в протон. В результате образуется электрон, который внутри ядра удерживаться не может (кулоновских сил недостаточно, чтобы локализовать электрон в области порядка  $10^{-13}$  см) и вылетает из него одновременно с антинейтрино:



Бета-частицами, точнее, бета-минус-частицами ( $\beta^{-}$ ), называются электроны, летящие с околосветовой скоростью, испускаемые ядрами при электронном распаде.

Антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ) - нейтральная частица с массой, меньше  $1/10^4$  массы электрона. Средняя длина свободного пробега нейтрино с энергией 1 МэВ в воде равна примерно  $10^{21}$  см (100 световых лет). Это намного превышает линейные размеры звезд. Такие нейтрино свободно пронизывают Солнце, а тем более земной шар. Открытие этой частицы принадлежит Ферми. Его основная идея состоит в том, что  $\beta$ -частицы и нейтрино не существуют в атомных ядрах, а рождаются в них в процессе  $\beta$ -распада, подобно тому, как фотон не является составной частью атома, а появляется в процессе лучеиспускания.

Частица, появляющаяся при  $\beta$ -распаде вместе с электроном сначала называлась нейтрино, а позднее стала называться электронным антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ), а частица, появляющаяся при  $\beta$ -распаде вместе с позитроном, - электронным нейтрино ( $\nu_e$ ). Конечно, деление на частицы и античастицы условно.

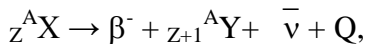
Энергия, высвобождающаяся при электронном распаде, распределяется между тремя компонентами: дочерним ядром, бета-частицей и антинейтрино. Бета-распад может со-

проводятся испусканием и  $\gamma$ -лучей. Механизм их возникновения тот же, что и в случае  $\alpha$ -распада, - дочернее ядро возникает не только в нормальном, но и в возбужденном состоянии. Переходя затем в состояние с меньшей энергией, ядро высвечивает  $\gamma$ -фотон. Подобные  $\beta$ -излучатели называют смешанными (например,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{69}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) в отличие от чистых бета-излучателей (например,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ).

Распределение энергии между  $\beta^-$ -частицей и антинейтрино в каждом акте распада совершается в различных соотношениях. Так как антинейтрино уносят разные доли энергии, то  $\beta^-$ -частицы одного и того же бета-источника имеют неодинаковую (как альфа-частицы) энергию. Именно поэтому энергетический спектр  $\beta^-$ -излучения любого бета-источника является непрерывным.

Средняя энергия  $\beta^-$ -частиц данного бета-излучателя составляет приблизительно треть максимальной. Для  $\beta^-$ -источников, известных в настоящее время,  $E_{\beta\text{макс}}$  лежит в пределах от 0,018 (третий) до 13,5 МэВ ( $^{12}\text{B}$ ), крайние значения могут отличаться друг от друга в 746 раз. Однако для большинства бета-источников  $E_{\beta\text{макс}}$  не превышает 2 - 3 МэВ.

Таким образом, электронный распад протекает по схеме:



где  $X$  - символ исходного ядра;  $Y$  - символ ядра продукта распада;  $Q$  - освобожденный избыток энергии.

Вопросы для самоконтроля.

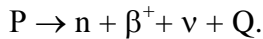
1. В каких ядрах чаще всего происходит электронный распад?
2. Что испускается из радиоактивного ядра при  $\beta^-$ -распаде?
3. Чему равны масса, заряд и интервалы возможных энергий  $\beta^-$ -частицы?



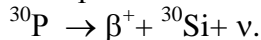
4. Дать характеристику антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ).
5. Какое место в таблице химических элементов Д.И. Менделеева занимает дочернее ядро после электронного распада материнского ядра?
6. Указать интервалы пробега в воздухе и в биологической ткани  $\beta$ -частицы различных излучателей.
7. Как распределяется энергия между  $\beta^-$ -частицей и антинейтрино в каждом акте распада ?
8. Как распределяется энергия, высвобождающаяся при электронном распаде?
9. Чем различаются смешанные от чистых бета-излучателей?

#### *Позитронный распад.*

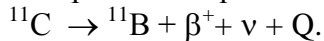
Если неблагоприятное соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено излишком протонов, то энергетически выгодным оказывается переход нуклона из состояния протона в состояние нейтрона с испусканием позитрона и нейтрино:



Позитронный распад наблюдается у некоторых искусственно полученных изотопов. Например, распад изотопа фосфора с образованием кремния:



Позитрон - античастица электрона, имеет равную с ним массу, но несет положительный заряд и в отличие от электрона недолговечен (время жизни  $10^{-10}$  -  $10^{-7}$  сек.). Источником позитронов являются лишь некоторые искусственные радионуклиды, имеющие избыток протонов, например  $^{11}\text{C}$ , в ядре которого при 5 нейтронах содержится 6 протонов:

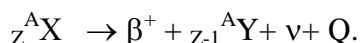


Конечный продукт реакции -  $^{11}\text{B}$ , изобар исходного радионуклида, имеет заряд ядра на единицу меньше (сдвиг влево).

Своеобразие позитронного распада заключается в том, что масса исходного протона меньше, чем масса нейтрона. Поэтому испускание позитрона требует поглощения, а не выделения энергии. Эта энергия образуется при перестройке остатка исходного ядра в конечное (в данном случае  $C^{11}$  в  $B^{11}$ ).

Масса нейтрона ( $m_n = 939,5731$  МэВ) несколько больше массы протона ( $m_p = 938,2796$  МэВ). Разница масс составляет  $1,2935$  МэВ. Поэтому энергетически возможно самопроизвольное превращение свободного нейтрона в протон. Такое превращение действительно наблюдается - среднее время жизни свободного нейтрона составляет около  $15,3$  мин, а период полураспада -  $12,8$  мин. Самопроизвольное превращение свободного протона и нейтрон энергетически невозможно, так как масса протона меньше массы нейтрона. Но превращение протонов в нейтроны возможно и действительно идет внутри атомных ядер - протон в ядре может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра. Именно в этом состоит само явление позитронного ( $\beta^+$ ) распада - недостаток энергии протона пополняется за счет энергии атомного ядра.

Позитронный распад протекает по схеме:



Заряд ядра и соответственно атомный номер элемента уменьшаются на единицу, и дочерний элемент будет занимать место в таблице Д.И.Менделеева на один номер влево от материнского; массовое число остается без изменения.

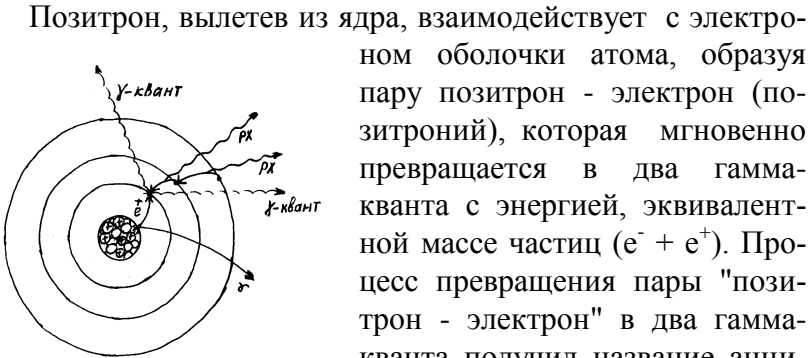


Рис. 10. Схема позитронного распада.

Таким образом, при позитронном распаде в конечном результате за пределы материнского атома вылетают не частицы, а два гамма-кванта, каждый из которых обладает энергией  $\geq 0,511$  МэВ, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц - позитрона и электрона  $E = 2mc^2 = 0,511$  МэВ. Кроме того, место в электронной оболочке, освобожденное аннигилированным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникают рентгеновские лучи (рис. 10). Таким образом, бета-распад может быть электронным или позитронным.

Вопросы для самоконтроля.

1. В каких ядрах чаще всего происходит позитронный распад?
2. Характеристика позитрона.
3. Какое место в таблице химических элементов Д.И. Менделеева занимает дочернее ядро после электронного распада материнского ядра?
4. Чему равен период полураспада свободного нейтрона?

5. Процесс образования позитрония.
6. Процесс образования аннигиляционного излучения.
7. Минимальная энергия аннигиляционного излучения.
8. Каким образом возникает рентгеновское характеристическое излучение при позитронном распаде?

### *Электронный захват (K-L-захват)*

Радионуклиды с избытком протонов избавляются от них также путем электронного захвата. Этот вид радиоактивного превращения возникает в том случае, когда в ядре не хватает энергии для позитронного распада. Тогда ядро захватывает электрон из ближайшего, K-слоя, и "лишний" протон, соединившись с этим электроном, превращается в нейтрон, испуская нейтрино (рис. 11). Возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие энергетические состояния, оно испускает  $\gamma$ -фотоны. Схема процесса выглядит следующим образом:

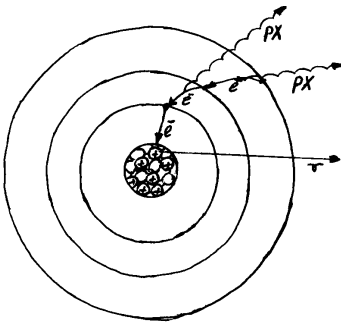
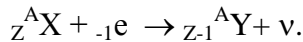
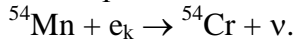


Рис. 11. Схема внутриядерной перестройки по типу электронного захвата.

Вследствие этого процесс называют также K-захватом. Таким образом, K-захват представляет собой процесс, прямо противоположный электронному распаду. Электронному захвату подвержен, например, марганец, превращающийся при этом в хром:



Как и при позитронном распаде, здесь дочерний элемент имеет на один протон меньше и, следовательно, отстоит в таблице Д.И.Менделеева на одну клетку влево от исходного.

Обычно электрон поглощается из K-слоя атома, поскольку этот слой находится ближе всего от ядра. Электрон

может поглощаться и из L- или M-слоя, но эти процессы значительно менее вероятны. Электронный захват имеет особенно существенное значение в случае тяжелых ядер, у которых K-слой расположен близко к ядру. Можно сказать, что в этом случае у электрона K-слоя имеется конечная вероятность находиться внутри ядра. Электронный захват всегда сопровождается рентгеновским излучением. Например, при захвате электрона из K-слоя на освободившееся место переходит электрон из L-слоя. На освободившееся место в L-слое в свою очередь переходит электрон из M-слоя и так далее. В результате возбуждается весь спектр характеристического рентгеновского излучения атома. По наблюдению такого спонтанного характеристического излучения и было открыто явление электронного захвата. Таким образом, в отличие от других типов распада здесь за пределы атома вылетает не частица, а рентгено-кванты.

Поскольку число зарядов в ядре при электронном захвате уменьшается на 1, то утрата одного орбитального электрона не нарушает электрического равновесия между ядром и оболочкой дочернего атома, а лишь его выравнивает. Как и при других типах распада, в атом извне ничего не привносится.

Скорость электронного захвата характеризуют периодом полухвата, имеющим аналогичное значение с периодом полураспада.

Позитронный распад и электронный захват в случае исходных ядер одного и того же сорта приводят к одинаковым окончательным состояниям. Поэтому эти два процесса часто идут одновременно, конкурируя друг с другом. Чаще электронный захват энергетически более выгоден, чем позитронный распад. Однако иногда ядра одного и того же изотопа могут испытывать все три вида бета-превращений. Например, ядра  $^{64}\text{Cu}$  в 39 % случаев испускают электроны, в 19% - позитроны, а в 42 % - испытывают электронный захват.

Некоторые радионуклиды испытывают одновременно два типа превращений: часть ядер - альфа-распад, часть - электронный распад. Так,  $^{212}\text{Bi}$  через альфа-распад превращается в  $^{208}\text{Tl}$ , но одновременно часть  $^{212}\text{Bi}$  через электронный распад превращается в  $^{212}\text{Po}$ .

Вопросы для самоконтроля.

1. Какой вид радиоактивного превращения возникает в том случае, когда в ядре не хватает энергии для позитронного распада?
2. В каких ядрах чаще всего происходит позитронный распад?
3. Каким образом возникает рентгеновское характеристическое излучение при электронном захвате?
4. Какое место в таблице химических элементов Д.И. Менделеева занимает дочернее ядро после электронного захвата в материнском ядре?

### 2.5.3. Гамма-излучение ядер и внутренняя конверсия электронов

*Гамма-излучением называется электромагнитное излучение, возникающее при переходе атомных ядер из возбужденных в более низкие энергетические состояния.* В таких процессах число протонов и нейтронов в ядре не изменяются, но испускаются  $\gamma$ -кванты. Этот тип внутриядерной перестройки называется *изомерным переходом*. В отличие от рентгеновских, ультрафиолетовых или видимых (световых) лучей гамма-кванты имеют ядерное происхождение. Но в ядрах  $\gamma$ -квантов, разумеется, нет. Они сопровождают альфа-или, чаще, электронный распад многих природных и искусственных нуклидов в тех случаях, когда при распаде не вся высвобождающаяся энергия захватывается частицами, вылетающими из ядра, и в последнем остается избыточная энергия. Тогда дочернее ядро из возбужденного состояния (более высокого энергетического уровня) переходит в ос-

новное, устойчивое состояние путем высвечивания  $\gamma$ -квантов, с которыми и избавляется от избытка энергии. Изолированный свободный нуклон испускать  $\gamma$ -квант не может. Однако этот процесс может происходить и действительно происходит внутри ядра, поскольку испущенный (или поглощенный)  $\gamma$ -квант может обмениваться импульсом не только с отдельным нуклоном, но и с остальными нуклонами ядра. Таким образом, в противоположность  $\beta$ -распаду, испускание  $\gamma$ -лучей есть внутриядерный, а не внутринуклонный процесс.

Высвечивание  $\gamma$ -квантов длится  $10^{-8}$  и даже  $10^{-20}$  секунд. При этом не изменяются ни заряд, ни массовое число. Гамма-кванты лишены заряда и поэтому в электрическом и магнитном поле не отклоняются. Скорость  $\gamma$ -квантов постоянна  $\sim 3 \cdot 10^{10}$  см/сек. в вакууме (равна скорости света), их масса покоя равна нулю. Гамма-излучение распространяется в веществе прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Энергия гамма-кванта ( $E_\gamma$ ) пропорциональна частоте колебаний и выражается формулой:  $E_\gamma = h\nu$ , где  $h$  - универсальная постоянная Планка, или энергетический эквивалент (элементарный квант действия), составляющий  $4,134 \cdot 10^{-21}$  МэВ/сек. ( $6,54 \cdot 10^{-27}$  эрг/сек.), а  $\nu$  - частота колебаний в секунду.

Частота колебаний  $\gamma$ -квантов связана с длиной их волны. Длина волны ( $\lambda$ ) - это кратчайшее расстояние между двумя ее гребнями, точнее, между точками пространства, в которых напряженность электрического (магнитного) поля имеет максимальное (минимальное) значение. Чем больше длина волны, тем меньше частота и наоборот, частота колебаний обратно пропорциональна длине волны.

Соотношение между частотой колебаний ( $\nu$ ) и длиной волны ( $\lambda$  - ламбда) можно выразить формулой:  $\nu = c/\lambda$ , то есть частота колебаний равна скорости света ( $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/сек.), деленной на длину волны. Из этого уравнения сле-

дует, что частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Длина волны гамма-квантов очень мала -  $10^{-9}$  и даже  $10^{-11}$  см (от десятых до тысячных долей ангстрема). Но даже  $10^{-11}$  см все же раз в 100 больше размеров ядра.

Скорость света - величина очень большая, а длина волны - величина очень малая, поэтому частота колебаний - величина очень большая -  $3 \cdot 10^{19}$  колебаний в секунду. Таким образом, энергия  $\gamma$ -кванта ( $E_\gamma$ ) при длине волны  $10^{-9}$  см равна 0,124 МэВ ( $h\nu = 4,134 \cdot 10^{-21}$  МэВ/сек.  $\cdot 3 \cdot 10^{19}$ ). Если длина волны будет короче, то соответственно и  $E_\gamma$  будет больше.

Энергия  $\gamma$ -кванта различных гамма-излучателей колеблется от 1 (мягкие  $\gamma$ -лучи) до 3 МэВ (жесткие) и редко достигает 5 - 6 МэВ. Очень жесткие гамма-лучи с  $E_\gamma > 17$  МэВ возникают лишь при некоторых ядерных реакциях. Энергия кванта жестких рентгеновских лучей находится в пределах 0,1 - 1 МэВ, ультрафиолетовых лучей - от 3 до 100 эВ, а видимого света - около 2 эВ. Рентгеновские лучи отличаются от  $\gamma$ -лучей не длиной волны (у жестких рентгеновских лучей она даже может быть более короткой, чем у мягких  $\gamma$ -лучей), а своим происхождением. Рентгеновские лучи имеют внеядерное происхождение, тогда как гамма-лучи идут из ядра.

Переход ядра из возбужденного состояния в нормальное при  $\gamma$ -излучении может быть однократным, когда ядро после испускания одного кванта сразу переходит в нормальное состояние. Но снятие возбуждения может быть и каскадным, когда переход осуществляется в результате последовательного испускания нескольких  $\gamma$ -квантов.

Гамма-источники очень редко имеют только однозначную энергию квантов, то есть они не бывают монохроматическими. Однако "набор" различных величин энергии для каждого источника постоянен и образует линейчатый спектр излучения. Так, например, жесткий гамма-источник  $^{60}\text{Co}$  излучает три группы  $\gamma$ -квантов (с  $E_\gamma = 1,17, 1,33$  и  $2,13$  МэВ),  $^{144}\text{Ce}$  - 7 групп  $\gamma$ -квантов (с  $E_\gamma$  от 0,01 до 0,13 МэВ), а



$^{192}\text{Ir}$  - даже 13 групп (с  $E_{\gamma}$  у от 0,13 до 1,06 МэВ). Только  $^{137}\text{Cs}$ , точнее его метастабильное дочернее ядро бария, является монохроматическим гамма-излучателем.

Возбужденные ядра, способные к испусканию  $\gamma$ -квантов, могут также возникать в результате захвата нейтронов, в результате кулоновского возбуждения ядер при столкновениях с заряженными частицами в различных ядерных реакциях. Среднее время жизни  $\gamma$ -активных ядер обычно невелико (порядка  $10^{-7}$ -  $10^{-11}$  сек.). Однако могут возникать и долгоживущие метастабильные  $\gamma$ -активные ядра со временами жизни макроскопического масштаба (до нескольких часов и даже больше). Такие возбужденные метастабильные ядра называются изомерами. Явление изомерии было открыто в 1921 г. Отто Ганом. Известно около сотни достаточно долгоживущих ядер. Наибольшее число изомерных состояний встречается у ядер с нечетным массовым числом. Время жизни возбужденного ядра изменяется в широких пределах (от очень малых долей секунды до многих тысяч лет). Так, изомер  $^{236}\text{Np}$  имеет период полураспада 5000 лет, а изомер  $^{135}\text{Cs}$  -  $2,8 \cdot 10^{-10}$  секунд.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какой вид радиоактивного превращения возникает при переходе атомных ядер из возбужденных в более низкие энергетические состояния?
2. В чём отличие гамма-квантов от рентгеновских, ультрафиолетовых или видимых (световых) лучей?
3. Каким образом возбуждённое ядро переходит в основное, устойчивое состояние?
4. Изменяются ли заряд, и массовое число ядра после изомерного перехода?
5. Дать физическую характеристику гамма-кванту.
6. Какие гамма-активные ядра называют изомерами?

*Внутренняя конверсия электронов.*

У смешанных альфа- и бета-излучателей не каждый акт распада атома сопровождается регистрируемым гамма-излучением. На самом же деле излучение имеется, но за пределы атома оно выходит в ином виде. Вылетая из ядра,  $\gamma$ -квант может сразу же встретиться с одним из орбитальных электронов данного атома и передать этому электрону всю свою энергию или часть ее. В этом случае за пределы атома вылетает не  $\gamma$ -квант, а только электрон. Этот процесс называется электронным преобразованием или внутренней конверсией гамма-квантов на оболочках возбужденных атомов.

Таким образом, переход возбужденного ядра в состояние с меньшей энергией может происходить не только путем излучения  $\gamma$ -кванта или выбрасывания какой-либо частицы, но и путем внутренней конверсии, или конверсии с образованием электронно-позитронных пар.

Явление внутренней конверсии состоит в непосредственной передаче энергии возбуждения ядра одному из электронов атомных оболочек (K-, L-, M-электрону и т. д.). Внутренняя конверсия сопровождается рентгеновским излучением, которое возникает в результате переходов электрона с вышележащих электронных слоев и оболочек на место, освобожденное электроном внутренней конверсии (рис. 12). Этот процесс вполне аналогичен обычному возбуждению рентгеновского характеристического спектра атомов. Энергия электрона внутренней конверсии ( $E_{BK}$ ) определяется выражением:

$$E_{BK} = E_{\gamma} + E_e,$$

где  $E_\gamma$  - энергия, освобождаемая при ядерной перестройке, а  $E_e$  - энергия связи электрона в электронной оболочке атома. Поскольку электроны внутренней конверсии могут быть сорваны с различных слоев оболочки, то они могут иметь соответственно и различную, но вполне определенную энергию, и поэтому в отличие от электронов электронного распада дают не непрерывный, а

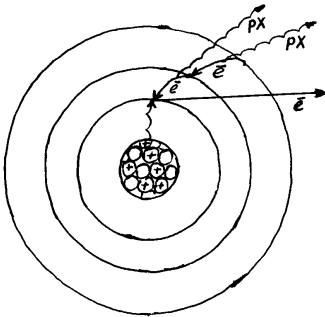


Рис. 12. Схема процесса внутренней конверсии.

линейчатый спектр. Сопровождающая электронный распад, электроны внутренней конверсии искажают истинную энергетическую кривую бета-спектра, на которой будут пики. Это и позволяет отличить их от электронов, испускаемых при  $\beta$ -распаде ядер, спектр которых непрерывен. Если энергия возбуждения ядра ( $E_\gamma$ ) меньше энергии связи электрона ( $E_e$ ) в К-слое, то, очевидно, внутренняя конверсия на электронах К-слоя энергетически невозможна. Такой случай может иметь место для тяжелых ядер. Однако в этом случае может происходить внутренняя конверсия на электронах других слоев.

Если энергия возбуждения ядра ( $E_\gamma$ ) превышает удвоенную собственную энергию электрона ( $E_\gamma > 2mc^2$ ), то есть больше 1,02 МэВ, то может происходить процесс парной конверсии, при котором ядро теряет энергию возбуждения путем одновременного испускания электрона и позитрона с последующей их аннигиляцией (см. позитронный распад). Однако вероятность парной конверсии не превышает примерно тысячной доли вероятности испускания  $\gamma$ -кванта.

Следовательно, испускание электронов конверсии обусловлено непосредственным электромагнитным взаимодействием ядра с электронами оболочки. Этот процесс, конку-

дают не непрерывный, а линейчатый спектр. Сопровождающая электронный распад, электроны внутренней конверсии искажают истинную энергетическую кривую бета-спектра, на которой будут пики. Это и позволяет отличить их от электронов, испускаемых при  $\beta$ -распаде ядер, спектр которых непрерывен. Если энергия возбуждения ядра ( $E_\gamma$ ) меньше энергии связи

рирующий с  $\gamma$ -излучением, называется внутренней конверсией электронов, а сами электроны - электронами внутренней конверсии. Отношение числа конверсионных электронов к числу  $\gamma$ -квантов, излученных в единицу времени, называется коэффициентом внутренней конверсии. Эти коэффициенты приводятся в специальных справочных таблицах.

В 1958 году было обнаружено резонансное поглощение  $\gamma$ -лучей, получившее название эффекта Мёссбауэра - по имени ученого, который сделал это открытие. Явление это аналогично оптической резонансной флуоресценции. Оно состоит в том, что если возбужденное ядро (или атом) испустило  $\gamma$ -квант, то другое такое же, но невозбужденное ядро (или атом) способно с большой вероятностью его поглощать. Так как в случае оптической области спектра - испускание и поглощение производится не ядрами, а электронными оболочками атомов, то вместо термина " $\gamma$ -квант" в оптической области спектра используется термин "фотон".

Вопросы для самоконтроля.

1. При каких условиях в результате изомерного перехода за пределы атома выбрасывается электрон, а не гамма-квант?
2. Механизм высвечивания характеристического рентгеновского излучения при внутренней конверсии.
3. При каких условиях происходит парная внутренняя конверсия?
4. В чём заключается эффект Мёссбауэра?

#### **2.5.4. Спонтанное деление тяжелых ядер**

В 1940 г. советскими физиками Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком был обнаружен процесс самопроизвольного деления ядер урана на две примерно равные части. Впоследствии это явление было наблюдаено и для многих других тя-

желых ядер. По своим характерным чертам спонтанное деление близко к вынужденному делению, которое рассматривается в разделе "Ядерные реакции".

### **2.5.5. Протонная радиоактивность**

Как следует из названия, при протонной радиоактивности ядро претерпевает превращение, испуская один или два протона (в последнем случае говорят о двупротонной радиоактивности). Этот вид радиоактивности наблюдался впервые в 1963 г. группой советских физиков, руководимой Г.Н.Флеровым.

### **2.5.6. Графические схемы радиоактивного распада**

Распад радионуклидов для наглядности можно изображать графически. Такие изображения называют энергетическими схемами распада или энергетическими диаграммами. Они иллюстрируют тип распада, количество и качество излучения, последовательность испускания частиц и квантов, их энергию (МэВ) и темп распада (период полураспада). На таких схемах приняты определенные условные обозначения. Параллельными горизонтальными линиями (жирными) обозначают основной энергетический уровень как исходного (верхняя линия), так и дочернего радионуклида (нижняя линия). Если же дочерний продукт стабилен, то его энергетический уровень обозначают жирной горизонтальной линией с косой бахромкой или справа у конца линии ставят нуль.

При наличии промежуточных энергетических уровней проводятся дополнительные горизонтальные линии (не жирные). Энергетические переходы между уровнями изображают стрелками, связывающими исходный и конечный энергетические уровни, причем направление и рисунок стрелки символизируют характер распада. Стрелки скошенные вправо или влево соответственно характеру испускаемых частиц и "смещению" дочернего радионуклида по таблице Д.И.Менделеева от исходного, материнского радионуклида. Поэтому электронный распад показывают стрелкой, скошенной вправо, позитронный распад - влево, элек-

тронный захват - тоже влево, но стрелкой линейного пунктира, альфа-распад - тоже влево, но двухконтурной стрелкой ("смещение" на две клетки влево). Излучение  $\gamma$ -квантов, не изменяющее число нуклонов, изображают извитой вертикальной стрелкой, направленной вниз. Сбоку от стрелки цифрой обозначают энергию частиц или квантов (МэВ) и рядом в скобках - выход данного вида излучения в процентах к общему числу актов распада. Одновременное испускание частиц или  $\gamma$ -квантов с двумя или большим значением энергии показывают соответствующим числом стрелок. Если дочерний продукт нестабилен и подвержен распаду, то схема соответственно усложняется промежуточными переходами, обозначаемыми по тем же правилам. Энергетические схемы составляются немасштабно для того, чтобы сэкономить место и придать им большую четкость.

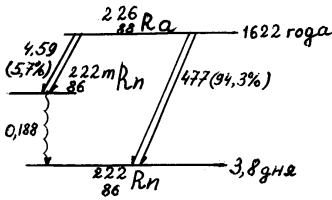


Рис. 13. Схема распада  $^{226}\text{Ra}$ .

На рис. 13 показана графическая схема распада  $^{226}\text{Ra}$  (заряд - 88,  $T_{1/2}$  - 1622 года). Внутрядерная перестройка этого изотопа происходит путем выброса  $\alpha$ -частиц. В 94,3 % случаях из ядра вылетает  $\alpha$ -частица с

энергией равной 4,77 МэВ; дочерним, в этом случае, является также нестабильное ядро  $^{222}\text{Rn}$  (заряд - 86,  $T_{1/2}$  - 3,825 дня). В остальных (5,7 %) случаях из ядра  $^{226}\text{Ra}$  вылетает  $\alpha$ -частица с меньшей энергией (4,58 МэВ); дочернее ядро радона - 222, содержащее избыточное количество энергии по сравнению с аналогичным в первом случае, называется возбужденным, метастабильным. Избыток энергии (0,188 МэВ) выделяется из него в виде  $\gamma$ -излучения.

Внутриядерная перестройка  $^{137}\text{Cs}$  (заряд - 55,  $T_{1/2}$ -30 лет) происходит путем выброса  $\beta^-$ -частиц (рис. 14). В 8 % случаях из ядра вылетает  $\beta^-$ -частица с энергией равной 1,18

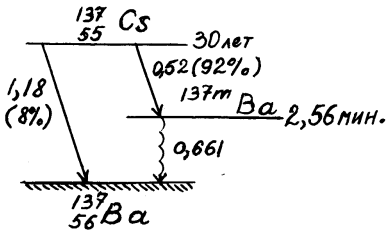


Рис. 14. Схема распада  $^{137}\text{Cs}$ .

МэВ; дочерним, в этом случае, является стабильное ядро  $^{137}\text{Ba}$  (заряд - 56). В остальных (92 %) случаях из ядра  $^{137}\text{Cs}$  вылетает  $\beta^-$ -частица с меньшей энергией (0,52 МэВ); дочернее ядро бария -  $^{137}\text{Ba}$ , содержащее избыточное

количество энергии по сравнению с аналогичным в первом случае, является метастабильным ( $T_{1/2}$  - 2,56 мин.). Избыток энергии (0,861 МэВ) выделяется из него в виде  $\gamma$ -излучения.

На рис. 15 показана графическая схема распада  $^{90}\text{Sr}$  (заряд - 38,  $T_{1/2}$  - 27,7 лет).

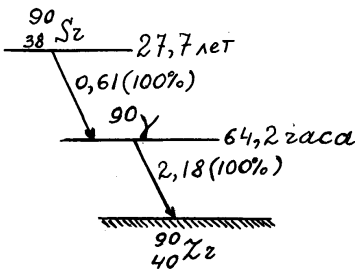


Рис. 15 Схема распада  $^{90}\text{Sr}$ .

Внутриядерная перестройка этого изотопа происходит только путем выброса  $\beta^-$ -частиц, причем, во всех 100 % случаях из ядра вылетает  $\beta^-$ -частица с энергией равной 0,61 МэВ; дочерним ядром является также нестабильное ядро  $^{90}\text{Y}$  (заряд - 39,  $T_{1/2}$  - 64,2 часа). Это радиоактивное ядро иттрия-90 также испытывает электронный распад в

100 % случаях, но энергия, выбрасываемая в этом случае с  $\beta^-$ -частицей намного больше и составляет в среднем - 2,18 МэВ. В результате такой перестройки получается стабильный атом - цирконий-90.

Рисунок 16 иллюстрирует распад  $^{40}\text{K}$  (заряд - 19,  $T_{1/2}$  -  $1,4 \cdot 10^9$  лет). В нестабильном ядре  $^{40}\text{K}$  внутриядерная перестройка может идти двумя путями. Чаще всего (в 88,4 % случаев) происходит электронный распад с выбросом высокоэнергетической  $\beta^-$ -частицы (1,33 МэВ) и образованием стабильного атома кальция-40. Однако в 11,6 % случаев ядро  $^{40}\text{K}$  захватывает электрон К-орбиты и превращается в метастабильный атом аргона-40, с последующим выделением избытка энергии в виде  $\gamma$ -излучения. В результате этого изомерного перехода образуется стабильный атом аргона-40.

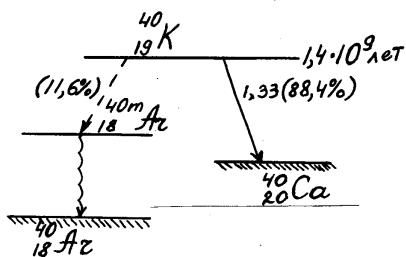


Рис. 16. Схема распада  $^{40}\text{K}$ .  
 выделением избытка энергии в виде  $\gamma$ -излучения. В результате этого изомерного перехода образуется стабильный атом аргона-40.

В нестабильном ядре  $^{64}\text{Cu}$  (заряд - 29,  $T_{1/2}$  - 12,8 часа) внутриядерная перестройка может идти по четырём путям (рис. 17). Чаще всего (в 42 % случаев) ядро  $^{64}\text{Cu}$  путем электронного захвата сразу преобразуется в стабильный атом никеля-64. В 39 % случаев происходит электронный распад с вы-

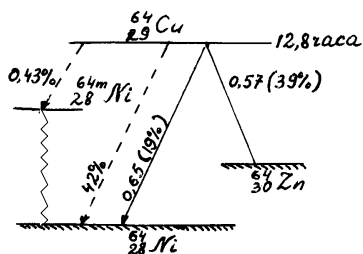


Рис. 17. Схема распада  $^{64}\text{Cu}$ .  
 бросом  $\beta^-$ -частицы (0,57 МэВ) и образованием стабильного атома цинка-64. В 19 % случаев ядро  $^{64}\text{Cu}$  также превращается в стабильный атом никеля-64, но уже путем позитронного распада. И только в 0,43 % случаев ядро  $^{64}\text{Cu}$  захватывает электрон К-орбиты и превращается в метастабильный атом никеля-64, с последующим выделением избытка энергии в виде  $\gamma$ -излучения



(1,34 МэВ). В результате этого изомерного перехода образуется стабильный атом никеля-64.

Вопросы для самоконтроля.

1. Как называют графическое изображение схемы распада радионуклида?
2. Что обозначают параллельными горизонтальными линиями (жирными)?
3. Что обозначают жирной горизонтальной линией с косой бахромкой?
4. Что обозначают дополнительными горизонтальными линиями (не жирными)?
5. Что обозначают стрелкой, скошенной вправо?
6. Что обозначают стрелкой, скошенной влево?
7. Что обозначают стрелкой пунктирной, скошенной влево?
8. Что обозначают двухконтурной стрелкой, скошенной влево?
9. Что обозначают извитой вертикальной стрелкой, направленной вниз?
10. Схема распада  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

## 2.6. Ядерные реакции

Все виды ядерных превращений подразделяются на две категории - ядерный (радиоактивный) распад и ядерные реакции.

Ядерный распад, рассмотренный в предыдущих разделах, заключается во внутриядерной перестройке нестабильных изотопов и вылете из этих ядер в окружающую среду альфа- или бета-частицы, нейтрино, антинейтрино, причем этот процесс у многих радионуклидов сопровождается высвечиванием электромагнитных излучений, с которыми дочернее ядро избавляется от избытка энергии. При ядерном

распаде в атом извне ничего не привносится. Масса и заряд дочернего ядра, возникающего после вылета частицы, близки к исходному ядру.

Ядерной реакцией, в широком смысле слова, называется процесс, возникающий в результате взаимодействия нескольких (как правило, двух) сложных атомных ядер или элементарных частиц. Под это определение подходят и такие реакции, при которых не образуются новые частицы, а происходит лишь перераспределение энергии и импульса между ними или одна из них переходит в возбужденное состояние. Чаще, под ядерными понимают такие реакции, среди исходных частиц которых, обязательно имеется, по крайней мере, одно ядро. Оно сталкивается с другим ядром или элементарной частицей, в результате чего происходит ядерная реакция и образуются новые частицы.

Как правило, ядерные реакции идут под действием ядерных сил при сближении взаимодействующих ядер до расстояний порядка  $10^{-13}$  см. Но могут быть и исключения из этого правила. Например, процесс расщепления ядра под действием  $\gamma$ -квантов высоких энергий или быстрых электронов тоже ядерная реакция, но она происходит под действием электромагнитных, а не ядерных сил, так как ядерные силы на фотоны и электроны не действуют.

Ядерные реакции подчиняются закону сохранения импульса и закону сохранения энергии, они могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии. Количество выделяющейся энергии называется энергией реакции. Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность между суммарной энергией покоя ядер и частиц до, и после реакции. Если сумма масс образующихся ядер превосходит сумму масс исходных ядер, реакция идет с поглощением энергии и энергия реакции будет отрицательной. Ядерные реакции, протекающие с выделением энергии, называются экзотермическими, а ядерные реакции, проте-

кающие с поглощением энергии, - эндотермическими. Экзотермическая реакция может идти при сколь угодно малой энергии сталкивающихся частиц. Напротив, эндотермическая реакция может идти только тогда, когда энергия сталкивающихся частиц превосходит некоторое минимальное значение. Это минимальное значение энергии, начиная с которого эндотермическая реакция может идти, называется порогом реакции.

Вопросы для самоконтроля.

1. Чем отличается ядерный распад от ядерной реакции?
2. На каком расстоянии взаимодействующих ядер возможна ядерная реакция?
3. Что называется энергетическим выходом ядерной реакции?
4. Какие ядерные реакции называются эндотермическими?
5. Какие ядерные реакции называются экзотермическими?
6. Что называется порогом ядерной реакции?

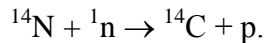
*Естественные ядерные реакции.*

Ядерные реакции могут происходить в естественных условиях, например, в недрах звезд или в атмосфере Земли под действием космических лучей. В пространствах Вселенной каждую секунду происходят космические катастрофы: вспыхивают новые и взрываются старые звезды, выбрасывая в межзвездные пространства ядра водорода, гелия и других элементов. В галактических магнитных полях эти ядра разгоняются до громадных энергий - в сотни и тысячи раз больших, чем достигнутые сегодня на ускорителях. Эти космические лучи, как их назвал Роберт Милликен, встретив на своем пути Землю, пронизывают атмосферу и, сталкиваясь с ядрами ее атомов, вызывают разнообразные ядер-

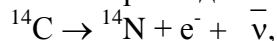
ные реакции: разбивают ядра на осколки, выбивают из них вторичные протоны и нейтроны.

Эти вторичные частицы вступают в новые ядерные реакции, одна из которых в 1946 г. привлекла особое внимание американского физика Уилларда Фрэнка Либби.

Он заметил, что выбитые нейтроны, сталкиваясь с ядрами атомов азота, из которого на 79 % состоит атмосфера Земли, могут выбить из них протон и превратить их в ядра углерода:



В отличие от обычного изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , редкий изотоп  $^{14}\text{C}$  радиоактивен: он распадается по схеме:



с периодом полураспада  $T_{1/2} = 5730$  лет. Каждую секунду на площадку в  $1 \text{ м}^2$  падает примерно 4000 космических протонов, которые после каскада ядерных превращений приводят к образованию примерно 2 ядер  $^{14}\text{C}$  в каждом кубическом сантиметре верхних слоев атмосферы. Эти изотопы углерода вскоре соединяются с кислородом и в виде углекислого газа усваиваются растениями, а затем животными и человеком. В результате такого круговорота в органическом веществе всех растений и животных устанавливается равновесная концентрация изотопа  $^{14}\text{C}$ , что можно обнаружить с помощью обычного счетчика Гейгера - Мюллера. Специальные исследования показали, что вследствие действия ветров и океанских течений равновесная концентрация  $^{14}\text{C}$  в различных местах земного шара одинакова - в 1 г углерода органического происхождения содержится примерно 70 млрд. атомов углерода  $^{14}\text{C}$ , причем каждую минуту 15 из них распадаются.

Пока организм живет, убыль в нем  $^{14}\text{C}$  из-за радиоактивного распада восполняется за счет участия в круговороте веществ в природе. В момент смерти организма процесс усвоения сразу же прекращается, и концентрация  $^{14}\text{C}$  в угле-

роде биологического материала начинает убывать по закону радиоактивного распада: через 5730 лет их станет вдвое меньше, еще через 5730 лет - вчетверо меньше и так далее. Это означает, что 1 г углерода только что срубленного дерева или убитого животного через 5730 лет будет излучать вместо 15 импульсов в минуту только 8, а еще 5730 лет спустя - 4 импульса в минуту. Следовательно, измерив концентрацию  $^{14}\text{C}$  в останках организмов (для удобства образец обычно сжигают и исследуют на радиоактивность образовавшийся углекислый газ) можно определить дату их смерти или, как говорят, их возраст.

Другой естественной ядерной реакцией можно считать спонтанное деление ядер урана, тория и радия, происходящее, по-видимому, также под действием космических лучей. При этом делящееся ядро разваливается на два "осколка", сумма зарядов которых составляет зарядовое число исходного ядра. При каждом акте деления, кроме того, возникает 2 - 3 свободных нейтрона.

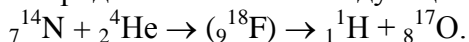
Вопросы для самоконтроля.

1. Чем отличаются естественные ядерные реакции от искусственных?
2. Где происходят естественные ядерные реакции?
3. Механизм образования  $^{14}\text{C}$  в природе.
4. Кругооборот  $^{14}\text{C}$  в природе.
5. Графическая схема распада  $^{14}\text{C}$ .
6. В чем заключается радиоуглеродный метод установления возраста органических останков.?
7. Привести примеры других естественных ядерных реакций.

*Искусственные преобразования атомных ядер.*

Впервые искусственное превращение ядра осуществил Э.Резерфорд в 1919 году. При изучении взаимодействия

альфа-частиц с ядрами азота он выявил случаи, когда  $\alpha$ -частица, попадая в атомное ядро, остается в нем, выбивая протон. При этом стабильный изотоп азота  $^{14}\text{N}$  превращается в изотоп кислорода  $^{17}\text{O}$  согласно следующей реакции:



Проникновение  $\alpha$ -частицы в ядро азота приводит к образованию неустойчивого ядра фтора, которое сразу же превращается в ядро кислорода с испусканием протона. При написании ядерных реакций часто используют сокращенную форму записи:  $^{14}\text{N} (\alpha, p) ^{17}\text{O}$ , то есть вначале пишут символ облучаемого элемента (ядро-мишень), затем в скобках указывают первой бомбардирующую частицу, второй - частицу или квант, вылетающие из ядра; после скобки указывают символ изотопа, продукта ядерной реакции.

Искусственные преобразования ядер были осуществлены и на других элементах. В 1934 г. И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия, магния и бора  $\alpha$ -частицами, образовавшимися при распаде полония, эти элементы сами становятся на некоторое время радиоактивными, о чем можно судить по испускаемому излучению.

Эти ядерные реакции были первыми, в которых создавались новые, ранее не существующие радиоактивные изотопы. Так была открыта искусственная радиоактивность и положено начало получению искусственных радиоизотопов практически всех элементов периодической системы.

Вопросы для самоконтроля.

1. Кто и когда впервые осуществил искусственное превращение ядра?
2. Правила написания сокращенной формы записи ядерных реакций.
3. Работы И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри по искусственному преобразованию ядер.

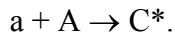
### 2.6.1. Основные механизмы ядерных реакций

В настоящее время радиоактивные изотопы можно получить при разнообразных ядерных реакциях с использованием в качестве бомбардирующих ядерных частиц - протонов, дейтронов, нейтронов, а также  $\gamma$ -квантов. Сущность ядерных реакций состоит в том, что ядра-мишени стабильных атомов, подвергаясь бомбардировке элементарными частицами, захватывают их и получают дополнительную энергию (кинетическую энергию частиц-снарядов); в результате образуется составное ядро с избытком энергии (возбужденное ядро).

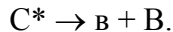
Через стадию образования так называемого составного, промежуточного или компаунд-ядра проходят многие ядерные реакции при невысоких энергиях. Представление о составном ядре было введено в физику в 1936 году Нильсом Бором. Он установил, что реакции, вызываемые не очень быстрыми частицами, протекают в два этапа. Частица, проникшая внутрь ядра, как правило, сильно взаимодействует с его нуклонами - настолько сильно, что ее энергия взаимодействия с отдельным нуклоном обычно того же порядка, что и кинетическая энергия самой частицы. Поэтому весьма вероятен захват частицы ядром. Частица застревает в ядре, причем из-за взаимодействия с нуклонами ядра ее энергия уменьшается настолько, что она длительное время не может покинуть ядро. Более того, частица, попавшая в ядро, вообще теряет свою индивидуальность. Из-за множества столкновений между нуклонами в поведении новых и прежних нуклонов принципиально пропадает всякое различие. Задерживаясь в ядре на некоторое время, нуклоны образуют систему частиц, которую в течение этого времени можно рассматривать как связанную. Эта система и есть составное, или промежуточное, ядро.

Составное ядро находится в возбужденном состоянии и стремится потерять энергию возбуждения за счет какого-либо возможного для него процесса. В принципе, оно не отличается от радиоактивного ядра. Один из возможных механизмов радиоактивного превращения состоит в том, что энергия захваченной частицы, беспорядочно распределившаяся между нуклонами составного ядра, в результате флуктуационных процессов вновь сконцентрируется на одной из частиц. Тогда такая частица и вылетит из ядра. Не обязательно, чтобы это была та же частица, которая влетела в ядро. Она может быть и другой: протон, нейтрон,  $\alpha$ -частица. Возможны несколько путей (каналов) радиоактивного распада составного ядра.

Таким образом, процесс столкновения частицы (а) с ядром (А) разбивается на два этапа. На первом этапе частица (а) сближается с ядром (А). Завершением этапа является образование составного ядра ( $C^*$ ) в возбужденном состоянии. Схематически этот процесс можно изобразить так:



На втором этапе происходит распад составного ядра по схеме:



Ядерная реакция в целом изображается схемой:



Наряду с процессом образования и распада составного ядра возможен и конкурирующий процесс. Это процесс радиационного захвата. В этом процессе ядро переходит в возбужденное состояние также в результате захвата какой-то частицы. Но в основное состояние оно возвращается путем испускания  $\gamma$ -кванта. Этот процесс происходит под действием уже электромагнитных сил, то есть в ядерном масштабе по-прежнему достаточно "медленно". Поэтому и при радиационном захвате также образуется составное ядро:





Реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами, протекают без образования промежуточного ядра. Такие реакции носят название прямых ядерных взаимодействий. Типичной реакцией прямого взаимодействия является реакция срыва, наблюдающаяся при нецентральных соударениях дейтрона с ядром. При таких соударениях один из нуклонов дейтрона может попасть в зону действия ядерных сил и будет захвачен ядром, в то время как другой нуклон останется вне зоны действия ядерных сил и пролетит мимо. В таких реакциях энергия, вносимая в ядро, передается преимущественно одному или небольшой группе нуклонов, которые и покидают ядро. Прямые ядерные реакции могут вызываться всевозможными налетающими частицами - от  $\gamma$ -квантов до многозарядных ионов во всем доступном диапазоне энергий (до нескольких гигаэлектронвольт и выше). Но, чаще всего прямые ядерные реакции осуществляются с участием дейтрона. Дейтрон имеет сравнительно "рыхлое" ядро, и эта рыхлость особенно ярко проявляется в реакции, когда энергия падающей частицы составляет несколько мегаэлектронвольт. Из-за относительно больших размеров дейтрона входящий в него нейтрон может проникнуть в ядро мишени, тогда как протон продолжает находиться еще вне поля действия ядерных сил, а со стороны ядра подвергается только действию кулоновских сил отталкивания и по этой причине так и не проникает в ядро. Именно это кулоновское отталкивание вызывает развал дейтрона и приводит к реакции срыва, происходящей под действием дейтронов. Обратной реакцией срыва является реакция подхвата, в реакции подхвата налетающий протон уносит один из периферийных нейтронов, так что из ядра вылетает дейтрон.

Реакции под действием нейтронов, протонов и  $\alpha$ -частиц во многих отношениях сходны между собой. Причина этого в одинаковом механизме реакций: в большинстве случаев

все они идут с образованием и последующим распадом составного ядра. Различие же между ними в основном связано с различием зарядов бомбардирующих частиц. Оно сказывается на проницаемости кулоновского барьера, когда бомбардирующая частица находится за пределами ядра, и становится мало существенным для последующего распада, образовавшегося составного ядра, когда начинают действовать ядерные силы, определяющие механизм реакции. Распад составного ядра представляет собой процесс, не зависящий от первого этапа реакции, заключающегося в захвате частицы (составное ядро как бы "забывает" способ своего образования). Одно и то же составное ядро может распадаться различными путями, причем характер этих путей и их относительная вероятность не зависят от способа образования составного ядра.

При использовании в качестве частиц-снарядов протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц ядерная реакция (проникновение их в ядро) идет с большим трудом, так как все они обладают положительным зарядом и прежде чем проникнуть в ядро-мишень, им приходится преодолевать электростатическое поле положительно заряженного ядра, то есть кулоновские силы отталкивания, так называемый кулоновский, или потенциальный, барьер. Положительно заряженные частицы преодолевают его лишь в том случае, если они имеют достаточный запас кинетической энергии. В экспериментальных условиях такие условия могут быть созданы или на ускорителях частиц, где им придается нужный разгон, или при нагревании смеси ядер до температуры в десятки миллионов градусов, что в обычных условиях недостижимо. Приборы для разгона заряженных частиц в сильном электрическом поле получили общее название ускорителей (линейные ускорители, циклотроны, бетатроны и фазотроны). При этом более тяжелые частицы обычно покоятся и называются частицами мишени, а более легкие, частицы - снаряды, налета-

тают на них в составе ускоренного пучка. Для отрицательно заряженных и нейтральных частиц кулоновский барьер не существует, и ядерные реакции могут протекать даже при тепловых энергиях налетающих частиц.

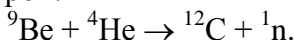
При бомбардировке ядра-мишени стабильного элемента нейтронами, протонами, дейтронами,  $\alpha$ -частицами происходит превращение одного элемента в другой (трансмутация элементов), или же образуется изотоп исходного элемента. В ряде случаев один и тот же радиоактивный изотоп может быть получен при использовании различных ядерных реакций. Например, изотоп фосфора  $^{32}\text{P}$  можно получить при бомбардировке природного фосфора  $^{31}\text{P}$  ядрами дейтерия ( $^{31}\text{P} + ^2\text{H} \rightarrow ^{32}\text{P} + ^1\text{H}$ ), медленными нейтронами ( $^{31}\text{P} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{32}\text{P} + \gamma$ ) и кремния -  $\alpha$ -частицами ( $^{28}\text{Si} + ^4\text{He} \rightarrow ^{32}\text{P} + ^1\text{H}$ ). Однако каким бы способом ни был получен радиоизотоп фосфора, он распадается и превращается в серу, испуская при этом  $\beta^-$ -частицу ( $^{32}\text{P} \rightarrow \beta^- + ^{32}\text{S}$ ).

Наиболее удобными бомбардирующими частицами, способными вызывать разнообразные ядерные реакции, являются нейтроны. Им, лишенным заряда, для проникновения в любое ядро-мишень не приходится преодолевать кулоновский барьер.

Нейтроны не излучаются при радиоактивном распаде, в природных условиях они возникают при расщеплении ядер азота и кислорода космическими лучами. Другим, хотя и незначительным природным источником нейтронов является спонтанное деление ядер урана, тория и радия, происходящее, по-видимому, также под действием космических лучей. При каждом акте деления возникает 2 - 3 свободных нейтрона.

В лабораторных условиях нейтроны часто получают из радиево-бериллиевой смеси (бромистая соль радия с порошком бериллия). Вылетающие из радия альфа-частицы бом-

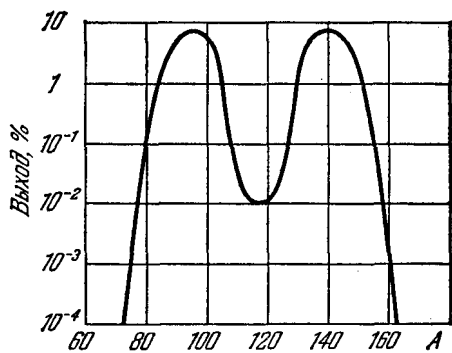
бардируют бериллий, который превращается в углерод, испуская при этом нейтрон:



В промышленных размерах нейтронные потоки получают с использованием ядерных реакторов в ходе цепной реакции деления урана.

В 1938 г. немецкие ученые О.Ган и Ф.Штрассман обнаружили, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы - барий и лантан. Объяснение этого явления было дано также немецкими учеными О.Фришем и Лизой Мейтнер. Они высказали предположение, что захватившее нейтрон ядро урана делится на две примерно равные части, получившие название осколков деления. Дальнейшие исследования показали, что деление может происходить разными путями. Всего образуется около 80 различных осколков, причем наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых относятся как 2:3.

Кривая, изображенная на рис. 18, показывает относительный выход (в процентах) осколков разной массы, возникающих при делении  ${}^{235}\text{U}$  тепловыми (находящимися в тепловом равновесии с атомами вещества, их энергия равна



примерно 0,03 эВ) нейтронами (масштаб по оси ординат - логарифмический). Из этой кривой видно, что относительное число актов деления, при которых образуются два осколка равной массы ( $A \sim 117$ ), составляет  $10^{-2}$  %, в то время как образование осколков с массовыми

Рис. 18. Относительный выход осколков деления  ${}^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами [43].

числами порядка 95 и 140 ( $95 : 140 \sim 2:3$ ) наблюдается в 7% случаев.

На один нуклон в акте деления неустойчивого ядра выделяется энергия, равная разности удельных энергий связи в ядрах - продуктах деления и исходного ядра ( $8,7 \text{ МэВ} - 7,6 \text{ МэВ} = 1,1 \text{ МэВ}$ ). Таким образом, удельная энергия связи для ядер средней массы примерно на 1 МэВ больше, чем у тяжелых ядер, поэтому деление ядер сопровождается выделением большого количества энергии. Но особенно важно то, что при делении каждого ядра высвобождается несколько нейтронов. Относительное количество нейтронов в тяжелых ядрах заметно больше, чем в средних ядрах. Поэтому образовавшиеся осколки оказываются сильно перегруженными нейтронами, в результате чего они выделяют по несколько нейтронов. Большинство нейтронов испускается мгновенно (за время, меньшее  $\sim 10^{-14}$  сек.). Часть (около 0,75%) нейтронов, получившая название запаздывающих нейтронов, испускается не мгновенно, а с запаздыванием от 0,05 секунды до 1 минуты. В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 выделившихся нейтронов.

Выделение мгновенных и запаздывающих нейтронов не устраняет полностью перегрузку осколков деления нейтронами. Поэтому осколки оказываются в большинстве радиоактивными (с самыми разными периодами полураспада) и претерпевают цепочку  $\beta^-$ -превращений, сопровождаемых испусканием  $\gamma$ -лучей.

Испускание при делении ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$  нескольких мгновенных и запаздывающих нейтронов делает возможным осуществление цепной ядерной реакции.

Вопросы для самоконтроля.

1. Чем различаются центральные и нецентральные ядерные реакции?
2. Принцип протекания центральных реакций по типу компаунд-ядра.

3. Принцип протекания центральных реакций по типу радиационного захвата.
4. Принцип протекания нецентральных реакций по типу срыва.
5. Принцип протекания нецентральных реакций по типу подхвата.
6. Когда и кто впервые осуществил реакцию искусственного деления урана?
7. Чему примерно равны массы большинства осколков ядерного деления урана?
8. Принцип и цепной ядерной реакции деления урана.

#### 2.6.2. Вынужденное деление ядер и цепные ядерные реакции деления в ядерных бомбах и реакторах

Энергия, освобождающаяся при делении атомных ядер, называется ядерной или атомной энергией. Ее получение в больших количествах производится в ядерных реакторах. Вещества, используемые в ядерных реакторах для осуществления ядерных реакций деления, называются ядерным топливом. В природе в естественном состоянии встречается только одно ядерное топливо - уран. Природный уран содержит 99,27 % изотопа  $^{238}\text{U}$ , 0,72 %  $^{235}\text{U}$  и около 0,01 %  $^{234}\text{U}$ . Следовательно, на каждое делящееся под действием медленных нейтронов ядро  $^{235}\text{U}$  приходится 140 ядер  $^{238}\text{U}$ , которые захватывают не слишком быстрые нейтроны без деления. Поэтому в природном уране цепная реакция деления не возникает.

Собственно, изотоп  $^{235}\text{U}$  и является ядерным горючим, поддерживающим реакцию ядерного деления. Изотопы  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  это основные сырьевые материалы, из которых искусственно получают делящиеся изотопы  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$ , они также являются ядерным горючим. Но эти изотопы в естественном состоянии в природе не встречаются. Основную роль в ядерной энергетике играют ядра изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$

и  $^{233}\text{U}$ , содержащие нечетное число нейтронов, так как они делятся нейтронами любых энергий, в том числе и тепловыми. Ядра  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  медленными нейтронами не делятся, а делятся только быстрыми нейтронами.

Для начала цепной реакции в принципе достаточно даже одного нейтрона. В толще урана они всегда есть: каждую секунду в 1 кг урана спонтанно делятся 7 ядер, и вылетающие при этом нейтроны могут быть инициаторами цепного процесса. Действительно, испущенные при делении одного ядра  $z$  нейтронов могут вызвать деление  $z$  ядер, в результате будет испущено  $z^2$  новых нейтронов, которые вызовут деление  $z^2$  ядер, и так далее. Таким образом, количество нейтронов, рождающихся в каждом поколении, нарастает в геометрической прогрессии. Нейтроны, испускаемые при делении ядер  $^{235}\text{U}$ , имеют в среднем энергию  $\sim 2$  МэВ, что соответствует скорости  $\sim 2 \cdot 10^9$  см/с. Поэтому время, протекающее между испусканием нейтрона и захватом его новым делящимся ядром, очень мало, так что процесс размножения нейтронов в делящемся веществе протекает весьма быстро.

Однако из-за конечных размеров делящегося тела и большой проникающей способности нейтронов многие из них покинут зону реакции прежде, чем будут захвачены каким-либо ядром и вызовут его деление. Кроме того, часть нейтронов поглотится ядрами неделящихся примесей, вследствие чего не вызовет следующих актов деления. **Размеры, состав и массу активной зоны, при которых становится возможной самоподдерживающаяся цепная реакция, называют критическими.** Для чистого  $^{235}\text{U}$  критическая масса приблизительно равна 0,8 кг, для  $^{239}\text{Pu}$  - 0,5 кг, для  $^{251}\text{Cf}$  - 10 г. Это количество ядерного топлива должно иметь, как можно, меньшую поверхность, чтобы была меньшая вероятность вылета нейтронов за пределы куска. Шар, среди всех геометрических тел равного объема, обладает наименьшей поверхностью. **Поэтому критической**

массе выгодно придать шарообразную форму. Величина критической массы может быть уменьшена, если атомный заряд окружить слоем вещества, отражающим нейтроны, возвращающим их во внутрь заряда. С ростом массы делящегося вещества относительная доля вылетающих наружу нейтронов уменьшается. Если масса активной зоны превышает критическую, то цепная реакция приобретает характер взрыва, и деление мгновенно ( $10^{-6}$  сек) охватывает все ядра урана. На этом принципе основано действие атомной бомбы. Для ее изготовления из природного урана выделяют изотоп  $^{235}\text{U}$ , что достаточно сложно, но возможно. Ядерный заряд такой бомбы представляет собой два или более кусков (на рис. 19 они обозначены цифрой 1) почти чистого  $^{235}\text{U}$  (или  $^{239}\text{Pu}$ ). Масса каждого куска меньше критической, вследствие чего цепная реакция не возникает. В куске чистого  $^{235}\text{U}$  (или  $^{239}\text{Pu}$ ) каждый захваченный ядром нейтрон вызывает деление с испусканием  $\sim 2,5$  новых нейтронов. Однако, если масса такого куска меньше определенного критического значения, то большинство испущенных нейтронов вылетает наружу, не вызвав деления, так что цепная реакция не возникает. При массе, большей критической, нейтроны быстро размножаются, и реакция приобретает взрывной характер.

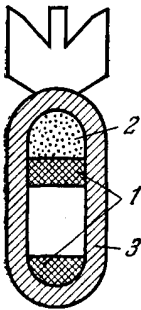


Рис. 19. Схема устройства атомной бомбы [43].

В земной атмосфере всегда имеется некоторое количество нейтронов, рожденных космическими лучами, которые в критической массе могут вызвать цепную реакцию. Поэтому, чтобы вызвать взрыв, достаточно соединить части ядерного заряда в один кусок с массой, большей критической. Это нужно делать очень быстро, и соединение кусков должно быть очень плотным. В противном случае ядерный заряд разле-



тится на части прежде, чем успеет прореагировать заметная доля делящегося вещества. Для соединения используется обычное взрывчатое вещество (2 - запал), с помощью которого одной частью ядерного заряда выстреливают в другую. Все устройство заключено в массивную оболочку (3) из металла большой плотности. Оболочка служит отражателем нейтронов и, кроме того, удерживает ядерный заряд от распыления до тех пор, пока максимально возможное число его ядер не выделит свою энергию при делении. Цепная реакция в атомной бомбе идет на быстрых нейтронах. При взрыве успевает прореагировать только часть ядерного заряда. Например, в Хиросиме было взорвано 20 кг  $^{235}\text{U}$ , "сгорело" - 0,7 кг урана, и масса бомбы уменьшилась только на 700 г. В Нагасаки была взорвана плутониевая (5 кг  $^{239}\text{Pu}$ ) бомба, при этом "сгорело" 1,2 кг  $^{239}\text{Pu}$ .

Таким образом, если делящийся материал для появления лавинного процесса имеется в достаточном количестве, то возникает мгновенная неуправляемая цепная реакция взрывного характера, что и приводит к ядерному взрыву. Но число свободных нейтронов можно регулировать так, чтобы при каждом акте деления свободным оказался бы только один нейтрон, который и произвел бы новый одиночный акт деления другого атома. Регуляция достигается посредством частичного поглощения нейтронов особым поглотителем (например, тяжелой водой). Число свободных нейтронов не будет при этом нарастать, но и не будет убывать. Процесс деления в этих условиях не будет взрывным, но и не затухнет. Он будет самоподдерживающимся и продолжится до тех пор, пока не поделятся ядра всего количества урана в данном куске. В атомных реакторах число нейтронов, вылетающих при делении тяжелых ядер, регулируется особыми стержнями-поглотителями избытка нейтронов. Атомные реакторы пока остаются единственными машинами, позволяющими управлять процессом деления ядер урана. Основной процесс, который в них идет - цепная реакция деления.

Объем, занимаемый делящимся веществом, называется активной зоной реактора. Цепная реакция практически осуществляется на так называемом обогащенном уране, с содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$  до 2 - 5 %. Обогащение естественного урана производится путем разделения изотопов.

Основная часть вторичных нейтронов появляется при делении ядер урана-235 тепловыми нейтронами. Но при делении образуются главным образом быстрые нейтроны. Чтобы сделать их более эффективными, используют различные замедлители, при рассеянии на ядрах которых нейтроны и замедляются до тепловых скоростей. Поэтому такие реакторы называются реакторами на тепловых нейтронах. В процессе замедления нейтрон может поглощаться ядрами  $^{238}\text{U}$ , ядрами замедлителя и ядрами других конструктивных элементов реактора. Вероятность того, что нейтрон не уйдет из активной зоны зависит от состава, размеров и формы активной зоны, а также от среды, окружающей активную зону. Если такая среда отражает нейтроны обратно в активную зону, то она увеличивает эту вероятность, называется отражателем и состоит из легких атомов, слабо поглощающих нейтроны (графит, бериллий).

Чтобы предотвратить радиационный захват нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$ , сравнительно небольшие блоки делящегося вещества, называемых тепловыделяющими элементами (ТВЭЛами), размещают на некотором расстоянии друг от друга, а промежутки между блоками заполняют замедлителем, веществом, в котором нейтроны замедляются до тепловых скоростей. Обычно ТВЭЛы образуют правильную решетку, а между ними располагается замедлитель. В этом случае, несмотря на то, что нейтроны сталкиваются с ядрами  $^{238}\text{U}$  в 140 раз чаще, чем с ядрами  $^{235}\text{U}$ , радиационный захват происходит реже, чем деление.

Замедление нейтронов осуществляется за счет упругого рассеяния. В этом случае энергия, теряемая замедляемой частицей, зависит от соотношения масс сталкивающихся ча-

стиц. Максимальное количество энергии теряется в случае, если обе частицы имеют одинаковую массу. С этой точки зрения идеальным замедлителем должно было бы быть вещество, содержащее обычный водород, например вода (массы протона и нейтрона примерно одинаковы). Однако такие вещества оказались непригодными в качестве замедлителя, потому что протоны взаимодействуют с нейтронами, вступая с ними в реакцию:  $p + n \rightarrow d + \gamma$ . В связи с этим в качестве замедлителя используют тяжелый водород (дейтерий или дейтрон), графит (углерод) и бериллий.

Для уменьшения энергии нейтрона от 2 МэВ до тепловых энергий в тяжелой воде ( $D_2O$ ) достаточно около 25 столкновений, в углероде (C) или бериллии (Be) - примерно 100 столкновений. Вылетевшие нейтроны, прежде чем дать начало новому поколению нейтронов, живут в реакторе меньше тысячной доли секунды. За это время они успевают испытать с ядрами углерода 114 соударений, пройти путь 54 см, замедлиться до тепловых скоростей и вызвать новое деление ядра урана. Число нейтронов в реакторе нарастает лавинообразно и через несколько секунд достигает уровня, который заранее задан расположением регулирующих стержней поглотителей. В каждом кубическом сантиметре объема мощного реактора содержится примерно полмиллиарда нейтронов, которые всегда "находятся в пути" от одного ядра урана к другому. В целом же внутри корпуса реактора устанавливается некоторое стационарное распределение нейтронов, так называемое нейтронное поле довольно сложной конфигурации, которым можно управлять.

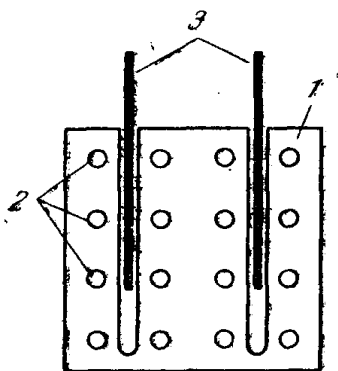


Рис. 20. Схема уран-графитового реактора [42].

Первый уран-графитовый реактор был пущен в декабре 1942 г. в Чикагском университете под руководством итальянского физика Э.Ферми. В Советском Союзе реактор такого же типа был пущен под руководством И.В.Курчатова в декабре 1946 г. в Москве.

Схема уран-графитового реактора приведена на рис. 20. Цифрой 1 обозначен замедлитель - графит; 2 - блоки из урана; 3 - стержни, содержащие кадмий или бор. Эти стержни служат для регулировки процесса в реакторе. Регулирование цепной реакции в ядерном реакторе на тепловых нейтронах обычно осуществляется дистанционно с пульта управления путем передвижения в активной зоне регулирующих стержней. Такие стержни изготавливаются из кадмия, карбида бора и других веществ, сильно поглощающих нейтроны. При увеличении глубины погружения регулирующих стержней в активную зону число поглощаемых нейтронов увеличивается, вследствие чего цепная реакция ослабевает и даже может совсем затухнуть. Наоборот, при выдвигании регулирующих стержней из активной зоны поглощение нейтронов уменьшается, а цепная реакция усиливается. Таким путем можно менять мощность реактора и поддерживать ее на требуемом уровне.

Применение ядерной энергии для мирных целей было впервые осуществлено в СССР под руководством И. В. Курчатова. В 1954 г. в Советском Союзе была введена в эксплуатацию первая атомная электростанция. Схема атомной

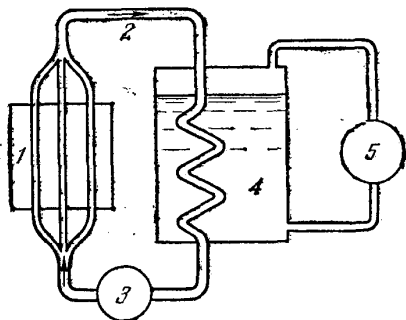


Рис. 21. Схема атомной электростанции [43].

электростанции изображена на рис. 21. Активная зона реактора имеет форму цилиндра размерами 1,5- 1,7 м. В графитовый замедлитель вводятся 128 ТВЭЛов, содержащих около 550 кг обогащенного до 5 % урана. Теплоносителем служит вода. Мощность электростанции составляет 5 МВт. Это - небольшая мощность; в мощных электростанциях количество ядерного топлива больше в сотни раз.

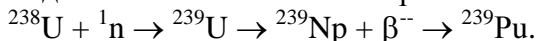
Энергия, выделяемая в активной зоне реактора (1), снимается теплоносителем, циркулирующим в контуре (2). Циркуляция обеспечивается насосом (3). В теплообменнике (4) теплоноситель отдает свое тепло воде, превращая ее в пар, вращающий турбину (5).

В результате деления ядер в активной зоне выделяется энергия в виде тепла. Количество тепловой энергии, выделяющейся в единицу времени, называется мощностью реактора. Так как при каждом акте деления выделяется энергия около 200 МэВ ( $3,2 \cdot 10^{-11}$  Дж), то мощности 1 МВт соответствует  $3 \cdot 10^{16}$  актов деления в секунду. Отвод тепла из активной зоны осуществляется теплоносителем, который в энергетическом реакторе должен с наименьшими потерями передать его в установку, вырабатывающую электроэнергию. При не чрезмерно больших тепловых потоках в реак-

электростанции изображена на рис. 21. Активная зона реактора имеет форму цилиндра размерами 1,5- 1,7 м. В графитовый замедлитель вводятся 128 ТВЭЛов, содержащих около 550 кг обогащенного до 5 % урана. Теплоносителем служит вода. Мощность электростанции составляет 5 МВт. Это - небольшая мощность; в мощных электростанциях количество ядерного топлива больше в сотни раз.

торах на тепловых нейтронах в качестве теплоносителя используются вода, водяной пар, воздух, азот и углекислый газ. В мощных реакторах, где активная зона прогревается до температуры 300 °С, использование воды затрудняется ее закипанием. Для предотвращения закипания приходится сильно повышать давление в системе теплоотвода. В реакторах на быстрых нейтронах, где энерговыделение громадно (около 0,5 кВт на 1 см<sup>3</sup>), как правило, теплоносителем служит жидкий натрий, обладающий хорошими теплоотводящими свойствами. На Чернобыльской атомной станции использовались РБМК-1000 (реактор большой мощности канальный). Это уран - графитовый реактор на тепловых нейтронах, в нем 200 каналов, 100 из них заполнены ТВЭ-Лами, в остальных - стержни из соединения стали с бором. После взрыва в 4 блоке, там осталось около 180 тонн ядерного топлива (~ 20 млн. Ки).

Первые промышленные реакторы предназначались для производства делящегося материала для атомных бомб - плутония. В таких реакторах часть нейтронов, испускаемых при делении ядер <sup>235</sup>U, идет на поддержание цепной реакции, часть же претерпевает радиационный захват ядрами <sup>238</sup>U, что приводит в конечном итоге к образованию <sup>239</sup>Pu:



После того как в урановых блоках накапливается достаточное количество <sup>239</sup>Pu, блоки извлекаются из реактора и направляются на химическую переработку для выделения из них <sup>239</sup>Pu.

Реакторы с замедлителем работают на медленных (тепловых) нейтронах. Используя горючее, обогащенное делящимся изотопом (<sup>235</sup>U или <sup>239</sup>Pu), можно построить реактор, действующий на быстрых нейтронах. Часть нейтронов в таких реакторах используется для превращения <sup>235</sup>U в <sup>239</sup>Pu или <sup>232</sup>Th в <sup>235</sup>U, причем, количество образующихся ядер, способных делиться тепловыми нейтронами, может

превосходить количество делящихся ядер, израсходованных на поддержание работы реактора. Следовательно, воспроизводится большее количество ядерного горючего, чем выгорает в реакторе. Поэтому такие ядерные реакторы называют реакторами-размножителями. Первый реактор на быстрых нейтронах (БР-1) появился в Обнинске в 1955 году. Активная зона этого реактора состоит из  $^{239}\text{Pu}$ , ее окружает оболочка из природного урана, ядра которого энергично захватывают быстрые нейтроны и через нептуний превращаются в плутоний.

Следует отметить, что побочными продуктами процессов, протекающих в ядерных реакторах, являются радиоактивные изотопы многих химических элементов, которые находят разнообразные применения в биологии, медицине, технике, а в случае аварии могут выбрасываться в атмосферу с последующим выпадением на почву в виде радиоактивных осадков по ходу радиоактивного облака.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что представляет собой критическая масса ядерного топлива?
2. Принцип работы атомной бомбы.
3. Что используют в качестве ядерного топлива?
4. Принцип работы ядерного реактора.
5. Принцип работы атомной электростанции.
- 6.

### 2.6.3. Термоядерные реакции

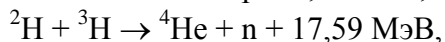
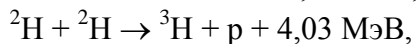
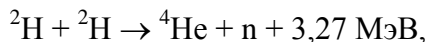
Энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, с возрастанием атомного номера сначала систематически возрастает, достигает максимума вблизи ядра железа, а затем начинает систематически убывать. Следовательно, слияние (или синтез) легких ядер и деление тяжелых приводят, как правило, к более прочной связи между нуклонами. Отсюда следует, что при делении тяжелых ядер и при синтезе лег-

ких должна освобождаться энергия. Синтез тяжелых ядер из легких ядер представляет собой особый вид ядерных реакций. И хотя этот процесс прямо противоположен делению, он энергетически еще более выгодный, чем реакция деления. Речь идет о синтезе гелия из ядер дейтерия и трития. Реакция синтеза дейтрона ( ${}^2\text{H}$ ) и ядра трития ( ${}^3\text{H}$ ) сопровождается выделением энергии, равной  $\sim 3,5$  МэВ на нуклон, а деление ядра урана приводит к высвобождению  $\sim 0,85$  МэВ энергии на нуклон. Ядра дейтерия и трития выбираются в связи с тем, что с увеличением зарядового числа кулоновский барьер между сближающимися ядрами возрастает пропорционально произведению зарядов обоих ядер. Осуществить слияние ядер тем легче, чем меньше зарядовое число. Особенно благоприятные условия для синтеза ядер дейтерия и трития, обусловлены тем, что реакция между ними носит резонансный характер. Именно эти вещества образуют заряд водородной (термоядерной бомбы). Но так как оба ядра заряжены положительно, то для возможности проведения этих реакций взаимодействующим ядрам должна быть сообщена кинетическая энергия, достаточная для сближения их на расстояние порядка  $10^{-11}$  см. Только после этого может начаться процесс слияния ядер за счет туннельного эффекта. Поэтому смесь дейтерия и трития должна быть полностью ионизирована. Этого можно достигнуть нагревом до нескольких, миллионов градусов. Кинетическая энергия теплового движения нуклонов в этом случае достигает нескольких кэВ, вещество будет в состоянии плазмы и наступит термоядерная реакция.

Таким образом, как и при делении тяжелых ядер, в реакциях синтеза легких освобождается энергия, в миллионы раз превосходящая тепло, получающееся при сжигании химического топлива (уголь, нефть). Однако получение этой энергии в макроскопических количествах удалось пока



только для военных целей - в водородной бомбе, где реакции:



осуществляются с огромной скоростью и сопровождаются чудовищным взрывом. Детонатором (запалом) водородной бомбы, кратковременно создающим температуру в десятки миллионов градусов, служит атомная бомба. По этой причине термоядерные реакции совершенно неуправляемы. Такие же реакции происходит в недрах Солнца, где температура достигает  $1,5 \cdot 10^7$  градусов. Для использования энергии этих реакций в мирных целях необходимо придать им спокойный управляемый характер. Эта проблема называется проблемой управляемого термоядерного синтеза и разрабатывается в различных странах, начиная примерно с 1951 года.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какое свойство ядерных сил лежит в основе синтеза тяжелых ядер из легких?
2. Какие вещества и почему образуют заряд водородной (термоядерной бомбы)?
3. Что является детонатором (запалом) водородной бомбы, кратковременно создающим температуру в десятки миллионов градусов?

### ГЛАВА 3. ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА СРЕДУ

Корпускулярное ионизирующее излучение представляет собой поток заряженных частиц или же ядер, обладающих массой покоя, различной скоростью, изменяющейся по мере пробега, и электрическим зарядом. В зависимости от знака заряда при пролете частицы в веществе она, испытывая

электростатическое взаимодействие, притягивается или отталкивается от положительно заряженных ядер и несущих отрицательный заряд электронов. *Основную роль в замедлении частицы играют процессы ионизации и возбуждения электронных оболочек атома. Все они получили собирательное название ионизационных потерь.*

Электромагнитное излучение состоит из потока квантов, имеющих волновую природу. Эти кванты лишены массы покоя и электрического заряда, обладают постоянной скоростью в вакууме, равной скорости света ( $3 \cdot 10^{10}$  см/сек), характеризуются длиной волны и частотой колебаний. При вылете из ядра эти излучения обладают определенным запасом кинетической энергии и вступают во взаимодействие с атомами окружающей среды.

Если энергия излучения, поглощенная электроном, превышает энергию связи электронов в атомах и молекулах окружающей среды, то излучение (частицы и гамма-кванты) вызывает их ионизацию, постепенно или же сразу затрачивая на это всю энергию. Если же энергия излучения меньше энергии связи электронов в атомах и молекулах среды, то последние лишь возбуждаются. Осуществляется, хотя и крайне редко, и чисто ядерное взаимодействие частицы с атомным ядром. За счет этих процессов энергия частицы уменьшается, и ее движение замедляется. Таким образом, кинетическая энергия частиц и квантов затрачивается в основном на ионизацию, в меньшей степени - на возбуждение встречных атомов и молекул, и лишь ничтожная доля ее при этом преобразуется в тепловую энергию. **Излучения, производящие ионизацию при взаимодействии с облучаемым веществом, называются ионизирующими.** К ионизирующим излучениям относятся излучения не только естественных радиоактивных веществ, но и излучения, возникающие при ядерных реакциях, космические и рентгенов-

ские лучи. Некоторой ионизационной способностью обладают и ультрафиолетовые лучи.

Ионизация представляет собой временное превращение электрически нейтральных атомов и молекул в заряженные образования - ионы. Ионом называется атом, утративший электрическую нейтральность. Ионизация атома наступает при отрыве одного (реже двух и больше) орбитального электрона из внешнего слоя оболочки. Это ведет к нарушению электрического равновесия между ядром и оболочкой. "Поврежденный" атом становится положительно заряженным ионом, а оторвавшийся электрон - отрицательным ионом. **Ионы всегда возникают парами.**

Излучение, проходя в веществе, ослабляется, его интенсивность уменьшается в результате взаимодействия частиц или квантов с атомами вещества. Различают два вида ослабления излучения: поглощение и рассеяние. Поглощение излучения характеризуется полной потерей энергии частицей или квантом в поглощающей среде (поглотителе). Рассеяние излучения характеризуется изменением направления движения кванта или частицы. Рассеяние может происходить без потери или с частичной потерей энергии (упругое и неупругое рассеяние). Эти два вида ослабления в разной степени проявляются у разных видов излучения. На образование каждой пары ионов ионизирующая частица или квант расходует некоторое количество кинетической энергии, называемое средней работой ионизации. В воздухе она составляет 34 - 35 эВ.

*Длина пути частицы в веществе, на котором она сохраняет способность производить ионизацию, называется пробегом частицы.* Другими словами, пробегом можно назвать минимальную толщину поглотителя, полностью поглощающую частицу данной энергии. Пробег частицы зависит от плотности среды. Зная величину энергии частицы или кванта и среднюю работу ионизации, можно определить общее число пар ионов, образуемых данной частицей в об-

лучаемом веществе. Учитывая плотность поглощающей среды, можно рассчитать пробег, а затем - удельную плотность ионизации (линейная плотность ионизации - число пар ионов, возникающих на единицу пути пробега) или в объеме вещества (объемная плотность ионизации).

*Энергию, теряемую заряженной частицей на единице ее пробега, называют линейной потерей энергии (ЛПЭ) - это количество энергии (кэВ) излучения, расходуемое частицей при прохождении 1 мкм в веществе. Установлено, что потеря энергии излучения пропорциональна среднему числу электронов на 1 см<sup>3</sup> (количество электронов на 1 грамм биоматериала составляет  $\sim 3,3 \cdot 10^{23}$ ). В зависимости от ЛПЭ все ионизирующие излучения делят на редко- и плотноионизирующие. К редкоионизирующим относят все виды электромагнитных излучений,  $\beta$ -излучения и потоки вторичных электронов, к плотноионизирующим - все остальные.*

Линейная передача энергии зависит от энергии частицы и ее заряда, причем эта зависимость резко усиливается со снижением скорости частицы. Электрическое поле заряженной частицы взаимодействует с электронами атомов вблизи пути пробега. По мере приближения частицы к атому электрическое поле и, следовательно, силы, действующие на атомные электроны, увеличиваются, с тем, чтобы снова уменьшиться после прохождения частицы; медленная частица оказывает более сильное воздействие на среду.

При вылете из ядра скорость частиц настолько велика, что большая часть находящихся рядом электронов атомов среды не успевают ощутить их присутствие. Поэтому в конце пробега, когда скорость частиц снижается в результате, пусть даже и небольших, ионизационных потерь, отдача энергии всякой заряженной частицы среде максимальна. Различие во времени взаимодействия частицы с находящимися рядом атомами среды приводит к характерному рас-

пределению ионизаций, описываемому кривой Брэга (рис. 22), с конечным максимумом - пиком Брэга.

Эта особенность взаимодействия тяжелых ядерных частиц используется при лечении опухолей (позволяет сосредоточить значительную энергию на глубине при минимальном ее рассеянии в здоровых тканях по ходу излучения).

Ионизированное состояние длится лишь стомиллионные доли секунды ( $10^{-8}$  сек.), после чего положительный ион присоединяет к себе какой-то из свободных электронов, происходит рекомбинация (восстановление в нейтральный атом или молекулу). Рекомбинация сопряжена с перегруппировкой орбитальных электронов. При этом энергия, ранее

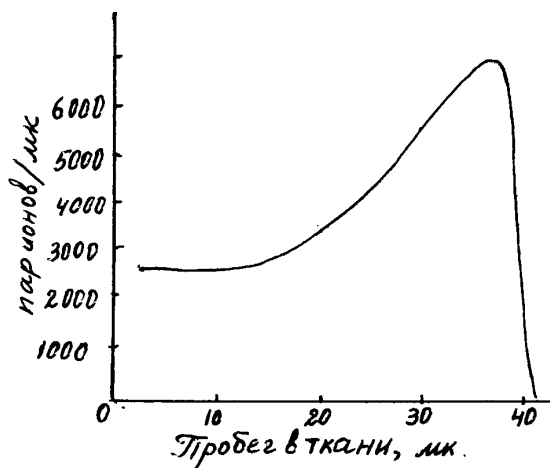


Рис. 22. Кривая Брэга (изменение плотности ионизации в веществе вдоль пробега альфа-частицы) [5].

поглощенная атомом при ионизации, превращается в простых веществах в тепловую энергию колебания молекул, но в некоторых веществах она выделяется с квантами рентгеновского, ультрафиолетового излучения и видимого света. В последнем случае возникает люминесценция.

Таким же путем избыток энергии отдается и возбужденными атомами. В сложных веществах возвращение атомов в невозбужденное состояние приводит также к появлению химически активных радикалов и к другим химическим превращениям. К этой категории изменений относятся процессы, первично возникающие при взаимодействии ионизирующих излучений с таким сложным веществом как биологическая ткань.

Таким образом, ионизирующие излучения, взаимодействуя с веществом, вызывают в нем различные эффекты - ионизацию, возбуждение, люминесценцию (первичные эффекты), химические и физические изменения (вторичные эффекты).

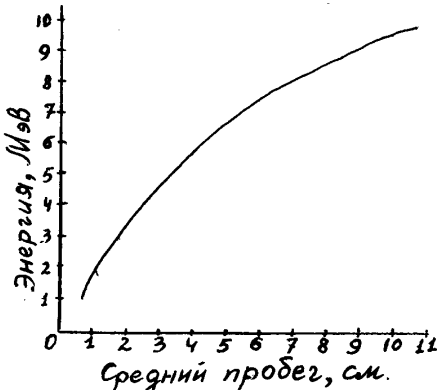
Вопросы для самоконтроля.

1. В чём заключается процесс ионизации атомов и молекул?
2. За счёт чего энергия ионизирующих частиц и квантов, проходящих в среде, снижается?
3. Какие излучения относят к ионизирующим?
4. Что называют средней работой ионизации?
5. Почему ионы образуются парами?
6. Что называют пробегом ионизирующей частицы и от чего зависит его величина?
7. Что называют линейной потерей (передачей) энергии (ЛПЭ ионизирующих излучений)?
8. Что называют удельной плотностью ионизации?
9. Какие излучения относят к редко- и плотноионизирующим?
10. Чем объясняется «пик Брэга»?
11. Последствия ионизации атомов и молекул среды (первичные и вторичные эффекты действия ионизирующих излучений на среду).

### 3.1. Особенности действия альфа-излучения на среду

Поскольку  $\alpha$ -частицы отдельных радионуклидов отличаются по величине энергии (2-11 МэВ), то они различны и по скорости полета, которая в среднем достигает 17000 км/сек. (в пределах  $1,4 \cdot 10^9$ - $2,06 \cdot 10^9$  см/сек.). Но в микромире такая скорость невелика, так как составляет лишь 0,1 скорости света (рис. 23). Пробег  $\alpha$ -частицы зависит не только от величины ее кинетической энергии, но и от плотности среды, в которой она пролетает. Пробег прямо пропорционален энергии  $\alpha$ -частицы и обратно пропорционален плотности среды. Заряженная частица, проходя через вещество, испытывает торможение из-за кулоновского взаимодействия не только с электронами, но и с атомными ядрами. Это - упругие столкновения с передачей энергии. Потери энергии

Рис. 23. Зависимость пробега альфа-частиц от их энергии [10].



частицы при кулоновском торможении на атомных ядрах в тысячи раз меньше чем на электронах. Однако из-за относительно большой массы ядра кулоновское рассеяние на ядрах может происходить на большие углы (и даже назад) уже в результате единичных актов рассеяния. Но, так как рассеяние альфа-частицы имеет ничтожное значение, то за счет сравнительно большой энергии, ее полет прямолинейен. Прямолиней-

ность пути связана также с большой массой тяжелой частицы по сравнению с массой легкого электрона, вследствие

чего при каждом взаимодействии с электроном она отклоняется очень мало и теряет очень небольшую долю от первоначальной энергии.

Из-за дальнедействующего характера кулоновских сил

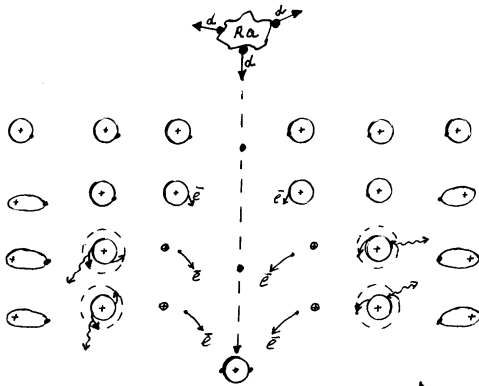


Рис. 24. Схема взаимодействия  $\alpha$ -частицы с условной (из атомов водорода) средой.

затем рекомбинируют с положительными ионами или присоединяются к нейтральным частицам, образуя отрицательные ионы. Атомы и молекулы среды, находящиеся на некотором удалении от траектории полета  $\alpha$ -частицы также испытывают электромагнитное воздействие заряженной частицы, однако, недостаточное для отрыва электрона (ионизации), поэтому они только возбуждаются. Атомы и молекулы среды, находящиеся еще дальше от пролетающей  $\alpha$ -частицы на несколько мгновений поляризуются, то есть орбиты электронов смещаются по направлению к  $\alpha$ -частице (рис.24). Если во время ионизации, возбуждения и поляризации атомы и молекулы не вступили в какую-либо химическую реакцию, то происходит рекомбинация.

Заряженная частица, пролетая в воздухе, образует в среднем одну пару ионов противоположного знака на 34 эВ потерь. Основные потери определяются зарядом, скоростью

$\alpha$ -частица взаимодействует сразу со многими электронами атомных оболочек, которые в свою очередь воздействуют на частицу. Так как скорость  $\alpha$ -частицы очень большая, сорванные ею электроны не успевают догнать ее и образуют "шлейф" электронов, которые



частицы, числом электронов в единице объема среды и средним ионизационным потенциалом атомов среды. Это воздействие носит случайный, хаотический характер, так что путь частицы в веществе практически прямолинеен. Направление полета может измениться только лишь под действием очень сильных электрических или магнитных полей, или же в тех очень редких случаях (примерно одна из 50 тысяч частиц), когда  $\alpha$ -частица прямо налетает на одно из ядер атомов облучаемого вещества.

Таблица 3.

Зависимость пробега альфа-частиц от их энергии и плотности среды [10]

E, МэВ	Среда и длина пробега альфа-частиц в ней			E, МэВ	Среда и длина пробега альфа-частиц в ней		
	воздух (см)	биологическая ткань (мк)	алюминий (мк)		воздух (см)	биологическая ткань (мк)	алюминий (мк)
4,0	2,5	31	16	7,5	6,6	81	43
4,5	3,0	87	20	8,0	7,4	91	48
5,0	3,5	43	23	8,5	8,1	100	53
5,5	4,0	49	26	9,0	8,9	110	58
6,0	4,6	56	30	9,5	9,8	120	64
6,5	5,2	64	34	10,0	10,6	130	69
7,0	5,9	72	39				

Таким образом, взаимодействие  $\alpha$ -частиц с веществом заключается, главным образом, в ионизации его атомов путем отрыва орбитальных электронов. Линейная плотность ионизации, произведенная альфа-частицами, огромна. Учитывая, что на образование одной пары ионов (средняя работа ионизации) в воздухе  $\alpha$ -частица затрачивает 34 эВ и, зная ее энергию при вылете из ядра, можно высчитать полное число образуемых ею пар ионов. Например, энергия альфа-частицы, испускаемой  $^{210}\text{Po}$ , равна 5,4 МэВ. Ее хватает на образование 154 тысяч пар ионов ( $5,4 \cdot 10^6$  эВ/34эВ). Так как

пробег  $\alpha$ -частицы  $^{210}\text{Po}$  по воздуху достигает 3,85 см, то на 1 мм пути альфа-частица образует в воздухе около 4000 пар ионов. Чем выше энергия частицы (чем быстрее она летит), тем меньше производимая ею плотность ионизации. В плотной среде плотность ионизации выше, потому что она пропорциональна плотности поглотителя.

Пробег  $\alpha$ -частицы в веществе замедляется по мере рас-  
трачивания ею энергии. При этом нарастает и плотность ионизации. Поэтому кривая плотности ионизации, производимой  $\alpha$ -частицами, к концу пробега дает резкий скачок, после чего падает до нуля. В мягких тканях в области "хвоста" пробега удельная плотность ионизации превышает первоначальную плотность в 3 - 4 раза (рис. 23). Если  $\alpha$ -частицы преодолели слой поглотителя, то они выходят из него, имея ослабленную, но одинаковую для всех частиц энергию. Отдав всю кинетическую энергию полета,  $\alpha$ -частица останавливается, присоединяет к себе два свободных электрона (создает оболочку) и становится нейтральным атомом гелия. Альфа-частица, проходящая через вещество, не всегда имеет двойной заряд, поскольку она может, захватив электрон, продолжать свой путь как частица, имеющая одиночный заряд (как ион гелия) и вследствие этого слабее взаимодействующая. Вероятность захвата увеличивается по мере того, как частица замедляется. Так как пробег  $\alpha$ -частицы обратно пропорционален плотности вещества поглотителя, а биологические ткани в среднем примерно в 730 раз плотнее воздуха, то пробег  $\alpha$ -частиц, например  $^{210}\text{Po}$ , в биологических тканях равен лишь 45 мк, но зато плотность ионизации колоссальна. Она в среднем равна 3420 пар ионов на 1 мк пути (154000/45). Поэтому  $\alpha$ -излучатели при попадании в организм крайне опасны для живой ткани.

Вследствие малой проникающей способности  $\alpha$ -частицы могут быть задержаны листом плотной бумаги,

одеждой, слоем резины хирургических перчаток и эпидермисом.

Вопросы для самоконтроля.

1. Интервалы величин энергии, скорости движения и пробега  $\alpha$ -частиц в воздухе и биологической ткани?
2. Механизмы воздействия  $\alpha$ -частиц на атомы среды.
3. Какое количество пар ионов (в среднем) образует  $\alpha$ -частица на 1 мм пути в воздухе ?
4. Что происходит с  $\alpha$ -частицей после того, как она растрачивает всю свою энергию?
5. Чем можно защититься от внешнего альфа-облучения?

### **3.2. Особенности действия бета-излучения на среду**

Для большинства бета-источников максимальная энергия  $\beta^-$ -частиц не превышает 2 - 3 МэВ. Взаимодействие  $\beta^-$ -частицы с веществом заключается в упругом многократном рассеянии энергии  $\beta^-$ -частиц на электронных оболочках встречных атомов, которые в результате ионизируются и возбуждаются. Это рассеяние пропорционально квадрату атомного номера облучаемого элемента (поглотителя). Разлетаясь в окружающей среде и взаимодействуя с атомами и молекулами этой среды,  $\beta^-$ -частицы растрачивают свою кинетическую энергию не только на рассеяние, но и на поглощение. Особенностью поведения легких частиц, к которым относятся  $\beta^-$ -частицы, состоит в том, что при изменении импульса в результате столкновения, электрон выделяет электромагнитное излучение. Поэтому, помимо ионизационных, появляются радиационные потери (потери энергии на излучение фотонов).

Полет  $\beta^-$ -частиц даже в воздухе не прямолинеен. Бета-минус-частицы, в сущности, являются электронами с высокой кинетической энергией, поэтому, имея малую массу и большую скорость, отскакивают от оболочек атомов, то есть орбитальных электронов.

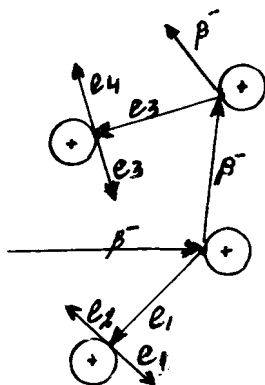


Рис. 25. Схема взаимодействия  $\beta^-$ -частицы с условной (из атомов водорода) средой.

Вторичные электроны, при достаточной энергии, также могут ионизировать среду.

Путь пробега  $\beta$ -частиц в среде извилист, проходит по изломанной линии, отклоняясь многократно от первоначального направления, бета-частица может даже полететь в обратном направлении (обратное рассеяние). Фактическая протяженность пробега до 4 раз больше толщины слоя вещества (пробега), через которое прошли  $\beta^-$ -частицы. Поэтому об определенном пробеге такой легкой частицы говорить нельзя. Можно ввести понятие максимального (или экстраполированного) пробега и среднего пробега. Максимальным пробегом называется минимальная толщина слоя вещества, в котором задерживаются все частицы. Он, очевидно, совпадает с полной длиной криволинейного пути, проходимого в веществе отдельной частицей.

Небольшая доля  $\beta^-$ -частиц, тормозящихся в электрическом поле тяжелых ядер атомов поглотителя, отдает свою

энергию, поэтому, имея малую массу и большую скорость, отскакивают от оболочек атомов, то есть орбитальных электронов. Орбитальные электроны, получившие энергию от  $\beta^-$ -частицы, покидают свою орбиту (вторичные электроны), в результате чего вместо нейтрального атома образуется положительный ион (рис.25). Вторичные электроны, при достаточной энергии, также могут ионизировать среду.

энергию с квантами рентгеновского излучения, направленными вперед, по ходу движения частицы. Это излучение тем больше, чем выше энергия  $\beta^-$ -частицы и больше атомный номер поглотителя. От таких потоков требуется защита, так как их проникающая способность значительно превосходит таковую электронов. На основе этого явления работают рентгеновские трубки.

Рентгеновская трубка (рис. 26) представляет собой эвакуированный баллон с несколькими электродами. Нагреваемый ток катод (К) служит источником свободных электронов, испускаемых вследствие термоэлектронной эмиссии. Цилиндрический электрод (Ц) предназначен для фокусировки электронного пучка. Мишенью является анод (А), который называют также антикатодом. Его делают из тяжелых металлов (W, Si, Pt).

Рентгеновские лучи возникают при бомбардировке быстрыми электронами твердых мишеней. Ускорение электронов осуществляется высоким напряжением, создаваемым между катодом и антикатодом. Почти вся энергия электронов выделяется на антикатоде в виде тепла (в излучение превращается лишь 1 - 3 % энергии). Поэтому в мощных трубках антикатод приходится интенсивно охлаждать. С этой целью в теле антикатада делаются каналы, по которым циркулирует охлаждающая жидкость (вода или масло).

Таблица 4.

Зависимость максимального пробега (R)  $\beta^-$ -частицы от ее энергии ( $E_\beta$ ) и плотности поглотителя [10]

$E_\beta$ макс. (МэВ )	Воз- дух (R, см)	Биоло- ги- ческая ткань (R, мм)	Алю- ми-ний (R, мм)	$E_\beta$ макс. (МэВ )	Воз- дух (R, см)	Биоло- ги- ческая ткань (R, мм)	Алю- ми-ний (R, мм)
0,1	10,1	0,158	0,050	0,9	261	4,10	1,30
0,2	31,3	0,491	0,155	1,0	306	4,80	1,52

0,3	56,7	0,889	0,281	1,25	406	6,32	2,02
0,4	85,7	1,35	0,426	1,50	494	7,80	2,47
0,5	119	1,87	0,593	1,75	610	9,50	3,01
0,6	157	2,46	0,778	2,0	710	11,1	3,51
0,7	186	2,92	0,926	2,5	910	14,3	4,52
0,8	231	3,63	1,15	3,0	1100	17,4	5,50

При создании между катодом и антикатодом напряжения, электроны разгоняются а, попав в вещество антикатада, испытывают сильное торможение и становятся источником электромагнитных волн. Это излучение называется тормозным, а потери энергии частицы на тормозное излучение - радиационными. Мощность излучения пропорциональна

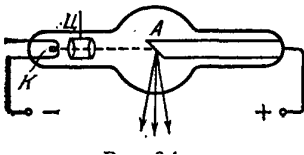


Рис. 26. Схема устройства рентгеновской трубки [43].

квadrату заряда электрона и квадрату его ускорения. Заметное излучение может наблюдаться лишь при резком торможении быстрых электронов. На рентгеновские трубки подается напряжение до 50 кВ. Пройдя такую разность потенциалов, электрон приобретает скорость, равную 0,4 скорости света. Малая длина волны и "жесткость", присущие рентгеновским лучам, обуславливает их основные свойства: а) высокую проникающую способность; б) способность вызывать ионизацию вещества, через которое они проходят. Поглощение рентгеновских лучей, сопровождающееся переходом их энергии во внутреннюю энергию вещества, в значительной степени зависит от атомного номера вещества. Так, поглощение рентгеновских лучей фосфорнокислым кальцием (кости) в 150 раз больше, чем водой (мягкие ткани).

В бетатроне электроны могут быть ускорены до 0,999 скорости света. Направив ускоренный в бетатроне пучок электронов на твердую мишень, получают рентгеновские

лучи весьма малой длины волны. Чем меньше длина волны, тем меньше поглощаются лучи в веществе. Поэтому рентгеновские лучи, получаемые на бетатроне, обладают особенно большой проникающей способностью.

При достаточно большой скорости электронов, кроме тормозного излучения (излучения, обусловленного торможением электронов), которое иногда называют "белым", возникает также характеристическое излучение (вызванное возбуждением внутренних электронных оболочек атомов антикатаода).

Поглощение частиц наступает при полной потере ими кинетической энергии в поглощающей среде. Например,  $\beta^-$ -частица замедляется в воде и 17 % ее энергии идет на возбуждение молекул воды; 35 % энергии переносится к вторичным электронам с кинетической энергией ниже 100 кэВ; 0,3 % энергии выделяется с рентгеновским излучением; 19% энергии - непосредственно на ионизацию. Потеря энергии  $\beta^-$ -частицами в любых поглотителях одинаковой толщины прямо пропорциональна плотности поглотителя. Чем плотнее поглотитель, тем короче в нем пробег  $\beta^-$ -частицы данной энергии. Таким образом, скорость и дальность полета  $\beta^-$ -частиц зависят не только от энергии, но и от плотности поглотителя, в которой совершается пробег.

Скорость полета  $\beta^-$ -частиц велика, зависит от их энергии и соизмерима со скоростью света. Так, например, при энергии 0,1 МэВ скорость полета  $\beta^-$ -частиц по воздуху составляет 50%, при 0,5 МэВ - 90%, а при 2 МэВ - 98% скорости света. Обладая такой скоростью,  $\beta^-$ -частицы имеют проникающую способность примерно в 100 раз большую, чем  $\alpha$ -частицы равной энергии. Это зависит от линейной плотности ионизации, которая у  $\beta^-$ -частиц намного меньше (примерно в 800 раз), чем у альфа-частиц. Средняя потеря энергии  $\beta^-$ -частицы на образование одной пары ионов в воздухе также составляет  $\sim 34$  эВ. Чем выше энергия

$\beta^-$ -частицы и меньше плотность поглотителя, то есть, чем больше начальная скорость и протяженность пробега  $\beta^-$ -частицы, тем меньше плотность ионизации, производимая ею в данной среде. Например, при  $E_\beta = 0,046$  МэВ плотность ионизации составляет в воздухе 22,8 пары, а при 1,1 МэВ - только 5,1 пары ионов на 1 мм пути. К концу пробега в связи с иссяканием энергии полет  $\beta^-$ -частиц замедляется. Поэтому такие "хвосты" пробега производят и более плотную ионизацию, приближающуюся к плотностям ионизации от  $\alpha$ -частиц.

Обладая неодинаковым запасом энергии,  $\beta^-$ -частицы затормаживаются на разной глубине поглотителя. Определение толщины слоя различных поглотителей, полностью поглощающего  $\beta^-$ -частицы различных энергий, имеет решающее значение для расчета биологической защиты. Толщину слоя поглощения обычно выражают не в единицах длины (см или мм), а в граммах на квадратный сантиметр ( $\text{г}/\text{см}^2$ ), то есть указывают число граммов, находящихся в столбике данного вещества с основанием  $1 \text{ см}^2$  и высотой, равной пробегу  $\beta^-$ -частиц.

Допустим, к примеру, что пробег  $\beta^-$ -частиц данной энергии в воде равен  $810 \text{ мг}/\text{см}^2$  ( $0,81 \text{ г}/\text{см}^2$ ) и что нужно определить, каков пробег этих частиц в более плотной среде, например в алюминии. Для этого по специальной справочной таблице (приложение, табл. 5) следует узнать плотность алюминия (она равна  $2,7 \text{ г}/\text{см}^3$ , то есть в 2,7 раза плотнее воды, плотность которой равна  $1 \text{ г}/\text{см}^3$ ), на которую делят пробег  $\beta^-$ -частиц в воде. В данном случае для поглощения  $\beta^-$ -частиц требуется  $0,81 \text{ г}/\text{см}^2 / 2,7 = 0,3 \text{ см}$  алюминия.

При различных расчетах, используемых в практике радиологических лабораторий (например, введение поправки на самопоглощение при измерении активности препарата), пользуются величиной  $\Delta_{1/2}$ . Это толщина слоя поглотителя, которая ослабляет интенсивность пучка данных  $\beta^-$ -частиц в



два раза. Ее называют слоем полуослабления потока  $\beta^-$ -частиц данной энергии и выражают в  $\text{мг}/\text{см}^2$ .

Поскольку энергетический спектр  $\beta^-$ -частиц является непрерывным ( $\beta^-$ -частицы данного источника обладают различной начальной кинетической энергией), то они и поглощаются на различной глубине слоя поглотителя. Кривая поглощения, полученная экспериментальным путем для не слишком толстых слоев поглотителя, похожа на экспоненту. Такая зависимость интенсивности  $\beta^-$ -излучения от толщины поглотителя может быть выражена и математически.

Если через  $N_0$  обозначить начальное число  $\beta^-$ -частиц, падающих на площадку  $1 \text{ см}^2$ , то число  $\beta^-$ -частиц  $N_d$  прошедших через слой поглотителя  $d$ , см., приближенно равно:  $N_d = N_0 e^{-\mu d}$ , причем  $\mu = \ln 2 / \Delta_{1/2} = 0,693 / \Delta_{1/2}$ , следовательно,  $\Delta_{1/2} = 0,693 / \mu$ , где  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления.

Большое практическое значение при измерении активности образцов проб различных объектов биосферы имеет  $\Delta_{1/2}$   $\beta^-$ -частиц в алюминии. Табличные данные о значении этих величин приведены в приложении (табл. 6).

Бета-частицы средних энергий задерживаются оконным стеклом, подошвой обуви, но через эпидермис проникают  $\beta^-$ -частицы с энергией уже 0,07 МэВ. Поэтому даже при работе с мягкими  $\beta^-$ -излучателями руки должны быть защищены перчатками, а от жестких  $\beta^-$ -частиц (с энергией 1,5 МэВ и выше) следует защищаться экранами из плексигласа или алюминия. Нельзя от жесткого  $\beta^-$ -излучения защищаться свинцом, так как возникает тормозное рентгеновское излучение, проникающая способность которого намного выше, чем  $\beta^-$ -частиц.

Вопросы для самоконтроля.

1. Интервалы величин энергии, скорости движения и пробега  $\beta^-$ -частиц в воздухе и биологической ткани?

2. Механизм ионизации  $\beta^-$ -частицами атомов среды.
3. За счет чего возникают радиационные потери  $\beta^-$ -частиц?
4. В чём отличие понятий «путь» и «пробег»  $\beta^-$ -частиц?
5. Какое количество пар ионов (в среднем) образует  $\beta^-$ -частица на 1 мм пути в воздухе?
6. Как рассчитывается максимальный и средний пробег  $\beta^-$ -частиц в среде?
7. Что происходит с  $\beta^-$ -частицей после того, как она растратит всю свою энергию?
8. Принцип устройства рентгеновских трубок и образование рентгеновских тормозных излучений «РТИ».
9. Как зависит величина пробега  $\beta^-$ -частиц от вещества поглотителя?
10. Что называют слоем полупоглощения ( $\Delta_{1/2}$ )  $\beta^-$ -частиц?
11. Чем можно защититься от внешнего  $\beta^-$ -облучения?

### **3.3. Особенности действия электромагнитных излучений на среду**

Электромагнитные излучения различаются по длине волны ( $\lambda$ ) а, следовательно, имеют разную энергию (рис. 27) и поэтому неодинаково воздействуют на вещества. Излучения с  $\lambda > 10$  м (радиоволны) не поглощаются атомными, молекулярными и надмолекулярными биологическими структурами. Ультракороткие волны (УКВ) вызывают вибрационные колебания некоторых молекул, приводящие к избирательному нагреванию тканей. Энергии квантов УКВ недо-

статочно для осуществления химических процессов. Электромагнитные излучения с еще более короткой длиной волны, чем УКВ (инфракрасные), поглощаясь, целиком превращаются в кинетическую энергию молекул и атомов, происходит прогревание тканей. Излучения с энергией фотона 0,4 - 4 эВ составляют область видимого света. В этой области отмечается резонансное поглощение энергии, обусловленное молекулярным строением вещества. Действие этого излучения отчетливо проявляется в фототропизме бактерий, простейших, растений и в воздействии на зрительные рецепторы животных и человека. Фотоны вызывают изомеризацию ретиналя (изменение геометрии молекулы), полученный трансретиналь отделяется от опсина (в темноте - восстанавливается), что вызывает гиперполяризацию мембраны, и возникший импульс поступает в мозг. Срок "жизни" одной молекулы родопсина  $\sim 10$  дней.

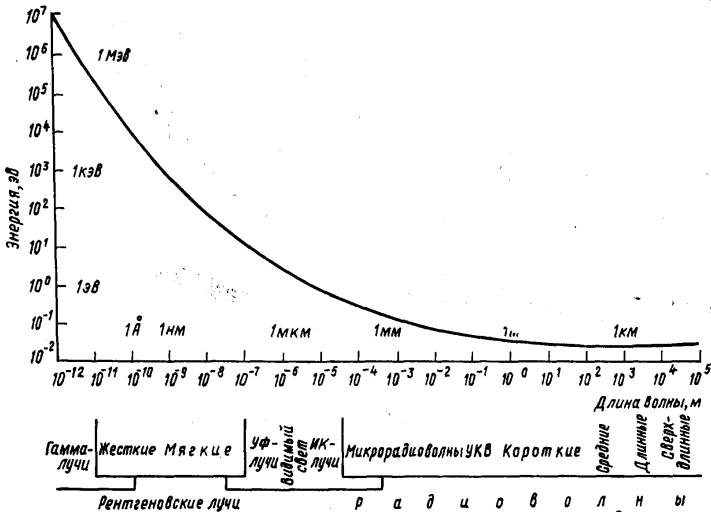


Рис. 27. Зависимость энергии электромагнитных излучений от длины волны [18].

Значительно большей способностью к поглощению обладают излучения, прилегающие к фиолетовой части видимого света и получившие название ультрафиолетовых излучений (УФ). Обладая величиной энергии фотонов от 4 до 40 эВ и частотой колебания, резонирующей с частотами колебания атомарных электронов, фотоны Ф-лучей легко поглощаются электронами валентных связей. Молекулы, поглотившие даже низкоэнергетический квант, переходят в возбужденное состояние и могут вступать в химические реакции, обычно не идущие при данной температуре. Это приводит не только к ослаблению, но и к распаду связей в молекуле, появлению свободных радикалов и, следовательно, резкому изменению химической активности веществ. Кванты ультрафиолетовых излучений особенно активно (резонансно) поглощаются молекулами провитамина Д<sub>3</sub> и азотистого основания тимина в ДНК. Когда квант ультрафиолетового излучения (фотон) попадает в ДНК, то он передает свою энергию азотистому основанию, и оно оказывается в возбужденном состоянии.

Если этот фотон поглотится тимином, который соседствует в цепи с другим тимином, то эти две соседних молекулы тимина вступают в химическую реакцию. Результат - новое химическое соединение, называемое фотодимером тимина, Т♦Т (рис. 28). Считать информацию с этого участка

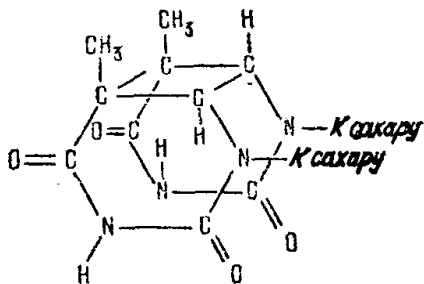


Рис. 28. Тиминовый димер [47].

ка ДНК становится невозможно и синтез информационной РНК прекращается.

Прямыми опытами на животных доказано, что тиминовые димеры могут вызвать рак.

Бактерицидное, эритемное и антирахитическое действие УФ-лучей являются наиболее известными

проявлениями биологического действия этого вида излучений. Озон верхних слоев атмосферы активно поглощает УФ-излучения, иначе жизнь была бы невозможна. Электромагнитные излучения еще большей энергии (400 эВ и более) способны не только возбуждать, но и ионизировать атомы и молекулы.

Ориентировочно к  $\gamma$ -излучению относят электромагнитные волны, длина которых значительно меньше межатомных расстояний, в равной мере это относится и к рентгеновскому излучению эквивалентной энергии. Излучение радиоактивных изотопов, независимо от их энергии, исторически обозначают как  $\gamma$ -излучение. В современных ускорителях получают  $\gamma$ -кванты с энергией до 20 ГэВ, ( $\lambda \sim 6 \cdot 10^{-15}$  см).

Пучок  $\gamma$ -квантов поглощается веществом за счет электромагнитных взаимодействий. Однако по сравнению с заряженными частицами  $\gamma$ -кванты не имеют электрического заряда. По этой причине они не подвержены влиянию действующих кулоновских сил. Взаимодействие  $\gamma$ -кванта с электроном ограничено областью, линейные размеры которой порядка длины волны электрона ( $\lambda \sim 10^{-11}$  см). Поэтому, проходя через вещество,  $\gamma$ -кванты сравнительно редко сталкиваются с электронами и атомными ядрами. Зато эти столкновения, как правило, сопровождаются резкими изменениями направления движения  $\gamma$ -квантов, что выводит их из пучка. Процесс поглощения квантов веществом сводится к тому, что они целиком передают всю свою энергию частицам вещества. Процесс поглощения электромагнитного излучения прерывный в пространстве и времени. Особенность  $\gamma$ -квантов состоит в том, что они, как безмассовые частицы, могут двигаться только со скоростью света. Гамма-кванты в веществе движутся от одной частицы (атома, молекулы) до другой как бы в вакууме, а "попадая" в частицу, поглощаются в ней и вновь возникают. Они не могут замедляться, а мо-

гут только либо поглощаться, либо отклоняться в сторону, либо порождать пары частица - античастица.

Гамма-излучение распространяется от источника равномерно и прямолинейно во все стороны. При этом энергия квантов излучения падает вследствие рассеяния и работы, затрачиваемой на другие виды взаимодействия с веществом, приводящие к вторичной ионизации. Рассеяние (так называемое классическое рассеяние) приводит лишь к отклонению гамма-кванта от первоначального направления, но не изменяет длину его волны. Не обладая зарядом,  $\gamma$ -квант в очень незначительной степени непосредственно ионизирует вещество, по сравнению с  $\alpha$ -и  $\beta$ -частицами, он более сложно взаимодействует со встречными атомами и, в частности, с их орбитальными электронами. В зависимости от атомного номера облучаемого вещества и от величины энергии  $\gamma$ -кванта он может взаимодействовать с атомами тройным путем. *Мягкое гамма-излучение вызывает фотоэффект, умеренное  $\gamma$ -излучение - явление Комптона, а жесткое - образование пар.*

В области низких энергий  $\gamma$ -квантов (порядка энергий связи электронов в атомных оболочках) преобладающим механизмом поглощения является фотоэффект, который особенно существен при взаимодействии  $\gamma$ -излучения с тяжелыми атомами; при высоких энергиях его роль становится ничтожной. Фотоэффект, или фотоэлектрическое поглощение, заключается в полном поглощении энергии  $\gamma$ -кванта орбитальным электроном (чаще всего электроном К-слоя). Этот тип взаимодействия преобладает в случае, когда энергия  $\gamma$ -кванта не превышает 0,05 МэВ, а поглотитель представляет собой элемент с большим атомным номером.

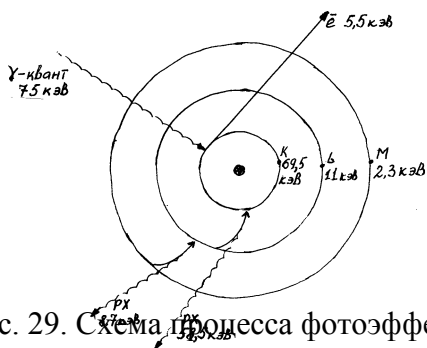


Рис. 29. Схема процесса фотоэффекта

На рис. 29 схематично показан фотоэффект в вольфраме при воздействии излучения с энергией 75 кэВ. Энергия связи электрона К-слоя с ядром вольфрама равна 69,5 кэВ. При поглощении кванта с энергией 75 кэВ на преодоление кулоновского притяжения тратится 69,5 кэВ (работа выхода) и с энергией 5,5 кэВ электрон, который теперь называется фотоэлектроном, вылетает из атома. Электроны L-, M-, N-, O-, P-слоев последовательно замещают вакансии и дают при этом рентгеновское характеристическое излучение (RX). Следует отметить, что при переходе с L- на К-оболочку испускается фотон (RX) с большой энергией (58,5 кэВ). Совершенно другая картина наблюдается в углероде, которого много в тканях. Энергия связи электрона К-слоя с ядром атома углерода равна только 0,3 кэВ, поэтому выбитый с этой оболочки фотоэлектрон получает энергию 74,7 кэВ, в то время как фотон, излученный при заполнении вакансии на К-оболочке, имеет энергию всего 0,3 кэВ. Он немедленно поглощается.

Поглощение электромагнитного излучения в процессе фотоэффекта является резонансным процессом, то есть поглощение квантов резко увеличивается при соответствии их энергий "работе выхода" электронов на различных орбитах атома.

При фотоэлектрическом поглощении часть энергии кванта затрачивается на преодоление энергии связи электрона с ядром, а остаток ее в виде кинетической энергии сообщается срываемому электрону (электрон отдачи или фотоэлектрон), который покидает оболочку атома и производит ионизацию соседних атомов. Вылетевший из атома электрон освобождает место на соответствующем энергетическом уровне, которое может быть занято электроном более удаленной от ядра орбиты; при этом выделится квант характеристического излучения. При переходе менее связанных электронов внешних орбит на вакантные уровни избыток энергии может непосредственно привести к вылету из

атома одного из электронов верхних оболочек (эффект Оже).

Таким образом, при фотоэффекте часть энергии первичных фотонов преобразуется в кинетическую энергию электронов (фотоэлектроны и электроны Оже), а часть - в энергию характеристического излучения. По мере уменьшения атомного номера поглотителя и увеличения энергии кванта фотоэффект уступает место другим видам взаимодействия.

С увеличением энергии  $\gamma$ -излучения, когда энергия  $\gamma$ -квантов начинает превосходить энергию связи электрона в атоме, фотоэлектрическое поглощение уступает место эффекту Комптона. Явление Комптона, или комптоновское рассеяние, возникает, когда поглотитель имеет малый атомный вес, например, атомы биологической ткани, а  $\gamma$ -кванты - энергию, превышающую 0,05 МэВ. При этом квант поглощается орбитальным электроном внешней оболочки атома, часть полученной энергии тратится на преодоление силы притяжения ядра, часть выделяется в виде электромагнитного излучения, но уже с большей длиной волны и с оставшейся энергией электрон, который теперь называется комптон-электрон, вылетает из атома (рис. 30).

Так как направление движения вторичного фотона отличается от первоначального, то говорят о рассеянии фотона на электроне.



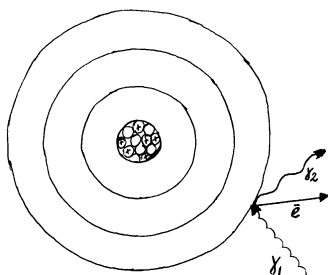


Рис. 30. Схема процесса Комpton-эффекта.

Угол, под которым вылетают комpton-электрон и вторичный фотон, зависит от количественного распределения переданной энергии. Чаще всего электрону передается либо очень незначительная, либо большая часть энергии  $\gamma$ -кванта, в результате чего рассеяние кванта ничтожно мало или происходит под углом  $180^\circ$  градусов. После ряда актов комптоновского рассеяния гамма-квант ослабевает, и когда его энергия падает ниже  $0,05$  МэВ, происходит фотоэлектрическое поглощение  $\gamma$ -кванта. Сорванные же электроны производят ионизацию других атомов. Ослабление пучка  $\gamma$ -квантов в веществе, обусловленное явлением Комптона, приводит не только к рассеянию  $\gamma$ -излучения (при этом оно выбывает из параллельного пучка) но и к частичному уменьшению энергии излучения за счет передачи части энергии комптоновским электронам отдачи (то есть поглощения).

Если энергия гамма-квантов достаточно велика, то они взаимодействуют с веществом посредством образования электрон-позитронных пар. Позитрон является античастицей по отношению к электрону. Он обладает той же массой, тем же спином, теми же по величине, но противоположными по знаку зарядом и магнитным моментом, что и электрон. Позднейшее развитие физики элементарных частиц показало, что каждая элементарная частица, как правило, имеет свою античастицу. Электрон и позитрон, сталкиваясь друг с другом, могут "исчезать", превращаясь в электромагнитное излучение. Этот процесс называется аннигиляцией. Свободно распространяющийся  $\gamma$ -квант не может породить пару, то есть превратиться в электрон и позитрон. Но про-

цесс образования пар может осуществляться и действительно осуществляется в электрическом поле атомного ядра.

Превращение  $\gamma$ -квантов в электрон-позитронные пары происходит не внутри ядра, а около него, в пи-мезонном облаке ядра, в пределах области с линейными размерами порядка длины волны электрона. Ядро воспринимает импульс отдачи, обеспечивая тем самым выполнение закона сохранения энергии - импульса, причем передача импульса отдачи ядру происходит посредством его кулоновского поля. Под действием электрического поля ядра  $\gamma$ -квант полностью превращается в пару из электрона и позитрона (энергия превращается в вещество). Но эта пара частиц может мгновенно нейтрализовать друг друга, произойдет, так называемая, аннигиляция (исчезновение вещества), превращение их в два вторичных  $\gamma$ -кванта ( $\gamma_2$  и  $\gamma_3$ , рис. 31 а). Энергия каждого вторичного  $\gamma$ -кванта будет в два раза меньше, чем у первичного исходного  $\gamma$ -кванта, то есть не менее чем по 0,51 МэВ. Это связано с тем, что энергетический эквивалент электрона, как и позитрона, составляет 0,51 МэВ ( $mc^2$ ). Именно поэтому первичный  $\gamma$ -квант должен иметь энергию не менее 1,02 МэВ. Вторичные  $\gamma$ -кванты способны вызвать лишь комптоновский эффект, а, в конечном счете - фотоэффект, то есть первоначальный квант постепенно деградирует в кванты с меньшей энергией, причем, в каждом таком элементарном акте деградации происходит возбуждение или ионизация. Если мгновенной нейтрализации не происходит, то образовавшийся электрон вылетает из атома и ионизирует среду по типу  $\beta^-$ -частицы, а позитрон, взаимодействует с одним из электронов среды.

В результате образуются два фотона аннигиляционного излучения с суммарной энергией  $2mc^2$  ( $\gamma_2$  и  $\gamma_3$ , рис. 31 б) и характеристическое рентгеновское излучение. Таким образом, при эффекте образования пар энергия первичных фотонов преобразуется в кинетическую энергию ионизирующих частиц (электронов и позитронов) и в энергию аннигиляционного излучения.

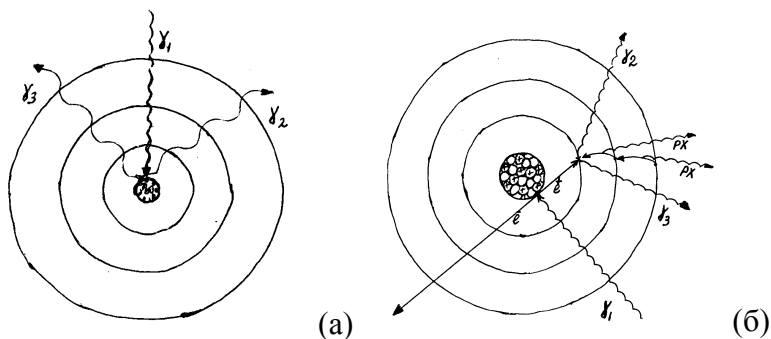


Рис. 31. Схема взаимодействия высокоэнергетического кванта ( $\gamma_1$ ) с атомом по типу образования электрон-позитронных ( $e^- + e^+$ ) пар.

Гамма-кванты могут рождать электрон-позитронные пары и в кулоновском поле электрона. Возможно также рождение пар при столкновении двух  $\gamma$ -квантов. Однако с наибольшей вероятностью происходит рождение пар  $\gamma$ -квантами в кулоновском поле ядра. Поскольку масса  $\gamma$ -кванта равна нулю, превратиться в электрон-позитронную пару он может только тогда, когда его энергия больше суммы энергий покоя электрона и позитрона:  $2mc^2 \geq 1,02$  МэВ. Порог рождения пары - 1,02 МэВ, если оно происходит в электрическом поле тяжелой частицы - атомного ядра, так как тяжелая частица уносит малую энергию. При еще большем увеличении энергии  $\gamma$ -квантов рождение пар становится сначала основным, а при дальнейшем росте энергии практически единственным механизмом поглощения  $\gamma$ -из-

лучения в веществе. Вероятность образования пар ( $e^- + e^+$ ) увеличивается не только с увеличением энергии квантов, но и с повышением плотности поглотителя. Если же пара рождается при столкновениях  $\gamma$ -квантов с электроном, то электрон получает энергию того же порядка, что и частицы пары. Поэтому в этом случае рождение пары возможно только при энергии  $\gamma$ -кванта, существенно превышающей  $2mc^2$ .

Как уже указывалось, процесс фотоэффекта преобладает при взаимодействии  $\gamma$ -лучей с малой энергией и в веществах с большим атомным номером. В воде, воздухе и живых тканях этот тип взаимодействия составляет около 50% при энергии квантов 0,06 МэВ. При  $E_\gamma$  0,12 МэВ доля фотоэффекта падает до 10%, а, начиная с 0,2 МэВ, становится ничтожно малой, так что ослабление гамма-излучения происходит за счет комптоновского рассеяния. Когда же  $E_\gamma$  превышает 1,02 МэВ, то начинается образование пар. Но этот тип взаимодействия становится существенным, начиная с энергии квантов от 2,5 МэВ и выше.

Из рассмотрения этих трех процессов следует, что в первичных актах взаимодействия фотонного излучения с веществом часть энергии преобразуется в кинетическую энергию корпускулярного излучения, а часть - в энергию вторичного фотонного излучения. Для дозиметрии особенно существенна та часть энергии фотонов, которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц. В общем случае одновременно могут идти все три процесса.

Помимо трех типов взаимодействия с веществом,  $\gamma$ -кванты могут обусловить еще один, достаточно редко регистрируемый процесс - так называемый ядерный фотоэффект. Он появляется лишь при очень большой энергии  $\gamma$ -квантов (более 8 МэВ). В этом случае энергия излучения поглощается ядром атома, в результате чего происходит или возбуждение ядра с последующим изомерным переходом,

либо фотоядерная реакция, сопровождающаяся вылетом из ядра нейтрона или протона.

Порог ядерного фотоэффекта соответствует энергии связи нуклона в ядре. Если энергия  $\gamma$ -квантов во много раз превышает среднюю энергию связи нуклона, то возможно фоторасщепление ядра с вылетом нескольких нуклонов.

*Альфа- и бета-частицы при взаимодействии с поглотителем растрачивают свою энергию очень небольшими порциями, но многократно, чем и обуславливают большую линейную плотность ионизации. В отличие от них  $\gamma$ -кванты за счет фотоэффекта, эффекта Комптона и рождение электронно-позитронных пар при взаимодействии с поглотителем теряют значительную часть своей энергии или даже всю энергию сразу (при фотоэлектрическом поглощении). В результате всех этих взаимодействий возникают вторичные электроны с различной энергией. Казалось бы, что поэтому  $\gamma$ -кванты не могут обладать особой проникающей способностью. Однако вероятность соударения  $\gamma$ -кванта с оболочками атомов поглотителя весьма невелика и, следовательно, плотность даже вторичной ионизации, вызываемая  $\gamma$ -квантами, по сравнению с бета-, а особенно с альфа-частицами очень мала.*

Для электромагнитных излучений с энергией  $\sim 250$  кэВ средняя энергия вторичных электронов равна 60 кэВ. При столкновении с электронами атомных орбит они могут вызвать 1700 ионизаций, так как в среднем на образование одной пары ионов расходуется примерно 34 эВ. Таким образом, только незначительная часть ионизаций (1/1700) при рентгеновском и гамма-облучении носит первичный характер. На образование одной пары ионов в воздухе гамма-квант затрачивает 34 эВ, но при этом на 1 мм пути в среднем образует только 0,6 пары ионов. Это меньше плотности ионизации, производимой  $\beta^-$ -частицами, примерно в 100 раз и  $\alpha$ -частицами в 10000 раз.

Поскольку  $\gamma$ -излучение мало теряет своей энергии на единицу пути в поглотителе, оно обладает сильной проникающей способностью. При облучении заряженными частицами ионизируется лишь только тонкий поверхностный слой, а при облучении  $\gamma$ -квантами - вся толща вещества. Поток рентгеновского и гамма-излучения в воздухе ослабляется по мере удаления от источника излучения. Пространственное ослабление происходит так же, как ослабление лучей видимого света - интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника излучения. Таким образом,  $\gamma$ -кванты выбывают из пучка, как правило, в результате единичных актов столкновения с электронами или атомными ядрами вещества, через которое они проходят.

Для  $\gamma$ -квантов нельзя ввести понятие пробега аналогично тому, как это делается для тяжелых заряженных частиц, испытывающих ионизационное торможение в веществе. Пучок  $\gamma$ -лучей поглощается непрерывно с увеличением толщины поглотителя и не обращается в нуль ни при каких величинах толщины поглотителя, то есть нельзя полностью поглотить поток  $\gamma$ -квантов, его можно только ослабить во много раз и близко к нулю. В этом основное различие характера ослабления  $\gamma$ -лучей от ослабления  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц, для которых всегда можно подобрать такой слой вещества, в котором полностью поглощается поток  $\alpha$ -или  $\beta$ -частиц.

Число  $\gamma$ -квантов, выбывающих из моноэнергетического пучка при прохождении слоя вещества определенной толщины, пропорционально этой толщине и интенсивности пучка, падающего на слой. Поэтому с расстоянием интенсивность параллельного моноэнергетического пучка  $\gamma$ -квантов убывает экспоненциально.

Зависимость интенсивности излучения ( $J$ ) узкого пучка гамма-излучения от толщины слоя данного поглотителя выражается формулой:  $J = J_0 e^{-\mu d}$ , где:  $J_0$  - интенсивность излучения при отсутствии поглотителя;  $d$  - слой поглотителя,

см;  $\mu$  - линейный коэффициент ослабления, характеризующий относительное ослабление излучения в слое вещества, толщиной 1 см. Линейный коэффициент ослабления является суммарным, он учитывает ослабление пучка  $\gamma$ -лучей за счет всех трех процессов: фотопоглощения, комптон-эффекта и образования пар. Поскольку величина  $\mu$  зависит от энергии поступающих квантов и от материала поглотителя, то ее можно выразить через отношение  $\mu/\rho$ , где  $\rho$  - плотность вещества поглотителя. В этом случае коэффициент  $\mu$  будет называться массовым коэффициентом ослабления.

Закон ослабления может быть выражен и через слой половинного ослабления ( $\Delta_{1/2}$ ). Толщина поглотителя, после прохождения которого интенсивность излучения ослабляется вдвое, называется слоем половинного ослабления;  $\Delta_{1/2}$  измеряется в единицах поверхностной плотности ( $\text{мг}/\text{см}^2$ ) и зависит как от энергии излучения, так и от плотности поглотителя. Между линейным коэффициентом ослабления и слоем половинного ослабления существует следующая зависимость:  $\Delta_{1/2} = 0,693/\mu$ . Из этого соотношения следует, что  $\mu = 0,693/\Delta_{1/2}$ . Поэтому зависимость интенсивности излучения  $J$  узкого пучка гамма-излучения от толщины слоя данного поглотителя (через слой половинного ослабления) можно выразить формулой:

$$J = J_0 e^{-0,693/\Delta_{1/2}}$$

Зная слой половинного ослабления можно определить, какой нужно взять слой поглотителя, чтобы ослабить излучение в  $n$  раз. Например: один слой  $\Delta_{1/2}$  уменьшит интенсивность излучения в 2 раза, два слоя - в 4 раза, три слоя - в 8 раз,  $n$  слоев в -  $2^n$  раз. Следовательно, чтобы ослабить интенсивность излучения, например, в 512 раз, надо взять столько слоев  $\Delta_{1/2} \cdot n$ , чтобы  $2^n = 512$ . В данном случае  $n = 9$ , то есть 9 слоев половинного ослабления уменьшают интенсивность излучения в 512 раз.

Таким образом, ослабление интенсивности узкого пучка гамма-излучения происходит по экспоненциальному закону. Расчет ослабления широкого пучка очень сложен и здесь можно пользоваться готовыми табличными данными. Но в том и другом случае интенсивность излучения при прохождении через сколь угодно большую толщину поглотителя не достигает нуля, хотя и будет достигать ничтожно малого значения. Это значит, что  $\gamma$ -кванты не имеют конечной длины пробега. Поэтому в отличие от  $\beta^-$ -излучения нельзя говорить об определенной максимальной величине пробега  $\gamma$ -квантов.

Знание величины слоя полуослабления  $\gamma$ -излучения в различных веществах важно для расчета биологической защиты. Эти величины определяются по соответствующим таблицам. Для биологической защиты от  $\gamma$ -излучения используются свинец, железо, бетон и другие вещества с высоким атомным номером.

Ослабление  $\gamma$ -излучения в поглотителе тем сильнее, чем меньше энергия квантов, больше плотность и порядковый номер поглотителя. По воздуху  $\gamma$ -кванты свободно пролетают сотни метров. При этом слой полуослабления ( $\Delta_{1/2}$ ) для квантов с энергией 2,5 МэВ составляет: в воздухе - около 200 м, в свинце - только 1,8 см, в бетоне - 10 см и в дереве - 25 см. Слой свинца толщиной 40 см ослабляет энергию  $\gamma$ -квантов в  $10^7$  раз.

Вопросы для самоконтроля.

1. Чем различаются различные виды электромагнитных излучений?
2. Как зависит энергия квантов электромагнитных излучений от длины волны и их частоты колебания?
3. Механизм воздействия длинных, средних и коротких радиоволн на биологическую ткань.



4. Механизм воздействия ультракоротких волн (УКВ) на биологическую ткань.
5. Механизм воздействия инфракрасных волн (ИФК) на биологическую ткань.
6. Механизм воздействия видимого света на биологическую ткань.
7. Механизм воздействия ультрафиолетовых волн (УФ) на биологическую ткань.
8. Механизм воздействия рентгеновского излучения на биологическую ткань.
9. Механизм воздействия гамма-квантов низкой энергии на атомы среды (фотоэффект).
10. Механизм воздействия гамма-квантов с энергией более 0,05 МэВ на атомы среды (Комптон-эффект).
11. Механизм воздействия гамма-квантов с энергией более 1,02 МэВ на атомы среды (образование электрон-позитронных пар).
12. Механизм воздействия гамма-квантов с энергией более 8-9 МэВ на атомы среды (фотоядерное расщепление).
13. Какое количество пар ионов образуется на 1мм пути в воздухе при электромагнитных излучениях с энергией 250 кэВ?
14. В чем различие характера ослабления  $\gamma$ -лучей от ослабления  $\alpha$  - или  $\beta$ -частиц?
15. Какие материалы используют для биологической защиты от рентгеновского и гамма излучения?

### **3.4. Особенности действия нейтронного излучения на среду**

По уровню энергии нейтроны делят условно на несколько групп: медленные (с энергией до 1 кэВ), промежу-

точные (1 - 500 кэВ), быстрые (0,5 - 10 МэВ), очень быстрые (10 - 50 МэВ) и ультранейтроны (свыше 50 МэВ). В свою очередь медленные нейтроны, имеющие в практике наибольшее значение, подразделяются на холодные, тепловые с энергией от 0,01 до 0,1 эВ (тепловыми называются нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с атомами вещества, с энергией равной, примерно 0,03 эВ), надтепловые и резонансные (0,4 эВ - 1 кэВ). При нейтронном облучении обычно говорят о нейтронном потоке, то есть количестве нейтронов, проходящих за 1 сек. через сферу, имеющую площадь сечения 1 см. При равных потоках нейтронов поглощенная энергия будет варьировать в зависимости от энергии нейтронов и состава облучаемой среды.

Вид взаимодействия нейтрона с ядрами-мишенями зависит от уровня энергии нейтрона и характера ядра-мишени. Наиболее значимы процессы рассеяния (для высокоэнергетических нейтронов), радиационного захвата (для медленных нейтронов) и реакции деления.

При рассеянии быстрый нейтрон и ядро могут разлететься в разные стороны (упругое рассеяние) без изменения их энергии. При неупругом столкновении нейтрон тоже не внедряется в ядро, но часть кинетической энергии нейтрона переходит во внутреннюю энергию ядра-мишени. Ядерной реакции при этом не происходит, возникают только изомерные возбужденные состояния ядер. Такие ядра через изомерный переход выделяют излишек энергии с гамма-квантом, которые в зависимости от энергии взаимодействуют со средой по типу фото-, комптон-эффектов или образования пар (рис. 32). Величина энергии, передаваемая нейтроном при столкновении ядру-мишени уменьшается по мере увеличения массы этого ядра: на ядрах водорода в среднем передается примерно половина энергии нейтрона (рис. 33); при столкновении с ядрами азота, углерода, кислорода и с другими легкими ядрами элементов, входящих в состав

биологической ткани - 10 - 15 %, а при взаимодействии с ядром свинца ~ 1 % энергии нейтрона.

Вещества с большим атомным весом (с тяжелыми ядрами) даже в очень толстых слоях свободно пропускают потоки быстрых нейтронов без заметного ослабления. Дело в

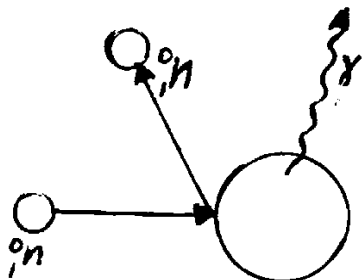


Рис. 32. Схема взаимодействия быстрых нейтронов с тяжелыми ядрами.

том, что быстрый нейтрон при соударении с массивным ядром не может его столкнуть с места, а "отскакивает" сам и, теряя незначительную часть своей энергии, летит дальше.

Вот почему

нейтроны легко проходят через толстый слой материалов, обладающих высоким атомным номером, например через свинец. Биологическая защита от нейтронов должна быть "слоеной" - сначала замедлитель, затем поглотитель. Замедлителями нейтронов служат легкие ядра, к которым относятся водородсодержащие вещества - вода (обыкновенная и тяжелая), парафин и др. В них преобладают протоны, а они по массе равны нейтронам. При столкновении с протоном нейтрон передает ему значительную часть (до 50 %) своей энергии.

После некоторого числа таких соударений энергия нейтрона быстро падает до энергии тепловых (медленных) нейтронов. Протон (ядро водорода), получив "толчок" (рис. 33), полетит с определенной скоростью (это так называемый протон или ядро отдачи) и, будучи заряженной частицей, взаимодействует с веществом, ионизируя его атомы. В ре-

зультате этого процесса в среде образуются короткие плотные скопления ионов.

При захвате медленного нейтрона возможны различные эффекты. При реакции захвата ядро мишени поглощая медленный нейтрон, превращается в собственный изотоп, массовое число которого по сравнению с исходным увеличивается

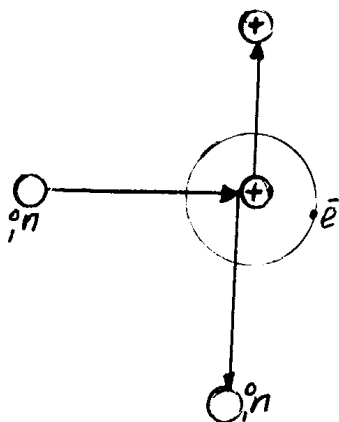


Рис. 33. Схема взаимодействия быстрых нейтронов с атомами (ядрами) водорода.

на 1 и приобретает избыток энергии. В огромном большинстве случаев продукт такой реакции радиоактивен и через ядерный распад превращается в стабильный изотоп другого элемента.

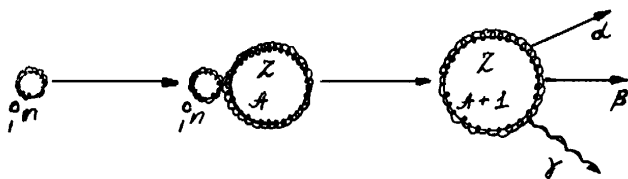
Однако, например, при бомбардировке природного фосфора медленными нейтронами ( ${}^{31}\text{P} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{32}\text{P} + \gamma$ ) происходит захват нейтрона, причем ядро теряет часть избыточной энергии в форме  $\gamma$ -кванта. При энергии нейтронов меньше 1 МэВ они поглощаются ядрами  ${}^{238}\text{U}$  без последующего деления урана. В результате образуется ядро  ${}^{239}\text{U}$ , энергия возбуждения которого выделяется также в виде  $\gamma$ -кванта (рис. 34). Поэтому такой процесс называется радиационным захватом (реакция  $(n, \gamma)$ ) или реакцией активации. В результате взаимодействия медленных нейтронов с атомами среды обычно возникает явление наведенной радиоактивности.

При энергии нейтронов меньше 1 МэВ они поглощаются ядрами  ${}^{238}\text{U}$  без последующего деления урана. В результате образуется ядро  ${}^{239}\text{U}$ , энергия возбуждения которого выделяется также в виде  $\gamma$ -кванта (рис. 34). Поэтому такой процесс называется радиационным захватом (реакция  $(n, \gamma)$ ) или реакцией активации. В результате взаимодействия медленных нейтронов с атомами среды обычно возникает явление наведенной радиоактивности.

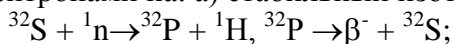
При энергии нейтронов меньше 1 МэВ они поглощаются ядрами  ${}^{238}\text{U}$  без последующего деления урана. В результате образуется ядро  ${}^{239}\text{U}$ , энергия возбуждения которого выделяется также в виде  $\gamma$ -кванта (рис. 34). Поэтому такой процесс называется радиационным захватом (реакция  $(n, \gamma)$ ) или реакцией активации. В результате взаимодействия медленных нейтронов с атомами среды обычно возникает явление наведенной радиоактивности.

При энергии нейтронов меньше 1 МэВ они поглощаются ядрами  ${}^{238}\text{U}$  без последующего деления урана. В результате образуется ядро  ${}^{239}\text{U}$ , энергия возбуждения которого выделяется также в виде  $\gamma$ -кванта (рис. 34). Поэтому такой процесс называется радиационным захватом (реакция  $(n, \gamma)$ ) или реакцией активации. В результате взаимодействия медленных нейтронов с атомами среды обычно возникает явление наведенной радиоактивности.

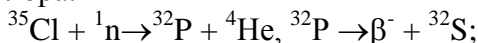
Рис. 34. Схема взаимодействия медленных нейтронов с ядрами атомов среды.



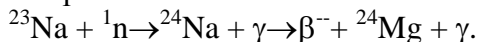
Особенно важное значение приобретает это явление при действии медленных нейтронов на стабильные ядра элементов тканей живых организмов, например, при воздействии медленными нейтронами на: а) стабильный изотоп серы:



б) изотоп хлора:



в) изотоп натрия:



*Трансмутация элементов изменяет характер химических связей, извращает биологическую активность молекул, что приводит к непредсказуемым последствиям.*

Возможны и другие процессы: например,  $^{14}\text{N}$  при захвате нейтрона может испустить протон высокой энергии (660 кэВ) и превратиться в  $^{14}\text{C}$ , водород после захвата нейтрона превращается в дейтрон с выделением  $\gamma$ -кванта высокой энергии (2,2 МэВ), а  $^{10}\text{B}$  и  $^6\text{Li}$  выбрасывают  $\alpha$ -частицу.

*Наиболее тяжелые ядра при захвате медленного нейтрона могут испытать деление.* Малая вероятность испускания заряженной частицы ( $\alpha$ -частицы или протона) в результате захвата медленного нейтрона связана с тем, что при вылете из ядра положительная частица должна преодолеть кулоновский потенциальный барьер. Поэтому вылет заряженных частиц при захвате медленных нейтронов в подавляющем большинстве случаев наблюдается лишь для самых легких ядер ( $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$ ). Для большинства тяжелых ядер захват нейтронов сопровождается  $\gamma$ -излучением, а при захвате нейтронов легкими ядрами наиболее вероятным

оказывается вылет из ядра нейтронов же, то есть осуществляется реакция упругого рассеяния нейтронов.

Радиационный захват возможен лишь с медленными нейтронами. Быстрые нейтроны очень плохо взаимодействуют с ядром, так как время пролета их вблизи ядра по сравнению с медленными нейтронами крайне невелико, а чем меньше скорость нейтрона, тем больше время, которое он проводит в сфере действия ядерных сил, пролетая вблизи ядра, и, следовательно, тем больше вероятность его захвата. Поэтому только медленные нейтроны могут быть наиболее продуктивно использованы для ядерных реакций, а быстрые нейтроны должны быть для этой цели предварительно как-то замедлены.

Таким образом, нейтронный обстрел стабильных атомов превращает их в радионуклиды или, как говорят, вызывает наведенную радиоактивность. Таков в настоящее время путь получения почти всех искусственных радионуклидов, аналогичные процессы идут в атомах строительных конструкций и оборудования АЭС.

Кроме того, как указывалось выше, нейтроны могут вызвать деление тяжелых ядер. Более подробно процесс деления под действием нейтрона можно рассмотреть на примере деления  $^{235}\text{U}$ . Ядро урана, захватившее нейтрон, превращается в составное ядро  $^{236}\text{U}$ . Ядро изотопа  $^{236}\text{U}$  в основном состоянии практически стабильно (период полураспада составляет  $2,4 \cdot 10^7$  лет). Такое ядро может совершать внутренние колебания около своей равновесной формы, не подвергаясь делению. Однако в результате захвата нейтрона получается ядро  $^{236}\text{U}$  в сильно возбужденном состоянии, и амплитуда колебаний может стать настолько большой, что ядро разделится на две части. При увеличении поверхности ядра энергия поверхностного натяжения возрастает, а энергия кулоновского отталкивания убывает. Поверхностное натяжение стремится вернуть деформированное ядро в исходное состояние, а кулоновское отталкивание способствует

его делению. Под действием кулоновских сил отталкивания эти части разлетаются со значительными скоростями. Ядерные силы, как силы притяжения, препятствуют этому разлету. Но при разлете превалируют электрические силы. Если ядро уподобить жидкой капле, то различные стадии, через которые проходит форма ядра в процессе деления, схематически можно представить следующим образом (рис. 35).

Деление ядер сопровождается дефектом массы  $\Delta$ , следовательно, высвобождением определенного количества энергии, как это следует из закона эквивалентности массы и энергии. Масса ядра  $^{235}\text{U}$  и бомбардирующего нейтрона больше, чем сумма масс двух ядер-осколков и двух нейтронов. Средняя энергия деления одного атома  $^{236}\text{U}$  составляет 195 МэВ. Около 90% энергии освобождается мгновенно. При этом 84% (167 МэВ) составляет кинетическую энергию осколков, а 6% (20 МэВ) - энергию свободных нейтронов и гамма-квантов. Остальная энергия (около 20 МэВ) распределяется при последующих актах электронного распада на энергию бета-минус частиц, антинейтрино и гамма-квантов.

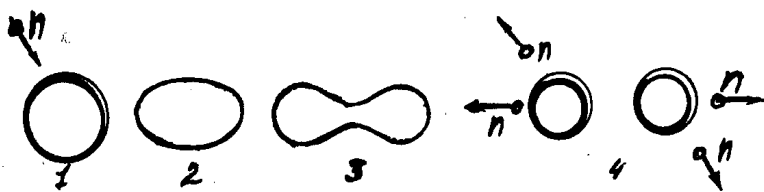


Рис. 35. Стадии деления ядра [47].

В масштабах макромира 167 МэВ - небольшая величина. Но так как 1 г  $^{236}\text{U}$  состоит из  $\sim 25 \cdot 10^{20}$  атомов ( $6,025 \cdot 10^{23} / 236$ ), то при его делении выделяется  $4 \cdot 10^{23}$  МэВ кинетической энергии, то есть около  $17 \cdot 10^9$  калорий. Эта величина в сотни миллионов и миллиарды раз превосходит энергию, освобождающуюся в единичном акте химических реакций, которая в лучшем случае составляет несколько

электронвольт, а обычно - десятые и даже сотые доли электронвольта.

Однако только очень небольшая часть ионизаций вызывается рассмотренными выше первичными процессами соударения и захвата. Основная часть ионизаций возникает в результате действия ядер отдачи и вторичного излучения, которое индуцируется в процессе нейтронного захвата. Нейтронные излучения относятся к плотноионизирующим, так как пробег ядер отдачи невелик. Плотность ионизации в конце пути электромагнитных и нейтронных излучений не возрастает как в случае с заряженными частицами. Наоборот, интенсивность этих излучений становится меньше.

Биологическая защита от нейтронов должна быть "слоеной" - сначала замедлитель, затем поглотитель. Замедлителями нейтронов служат легкие ядра, к которым относятся водородсодержащие вещества, в которых преобладают протоны, а они по массе равны нейтронам. При столкновении с протоном нейтрон передает ему до 50 % своей энергии. Поглотителями нейтронов являются бор и тяжелые элементы (кадмий, железо, свинец), часто используют бетон с железным наполнителем и соединениями бора.

Вопросы для самоконтроля.

16. На какие группы (условно) делят нейтроны по уровню энергии?
17. Каков механизм взаимодействия быстрых нейтронов с атомами водорода?
18. Каков механизм взаимодействия быстрых нейтронов со средними по массе атомами?
19. Каков механизм взаимодействия быстрых нейтронов с тяжелыми по массе атомами?
20. Каков механизм взаимодействия медленных нейтронов с атомами среды?
21. Что такое «наведённая радиоактивность»?



22. Что такое «трансмутация» и как она влияет на функциональную активность биологических молекул?

23. Какие материалы используют для биологической защиты от нейтронного излучения?

#### **ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ДОЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

Необходимость количественной и качественной оценки действия ионизирующего излучения на организм человека и животных, различные вещества живой и неживой природы, проведение контроля радиационной безопасности при работе с излучениями вызвали потребность во введении дозовых характеристик ядерных излучений.

Слово "доза" означает определенное количество чего-нибудь. Различают два вида дозы: доза вещества и доза излучения. Мерой дозы вещества может быть масса или активность (для радиоактивного вещества). Мерой дозы излучения является энергия, переданная излучением облучаемому веществу.

Термин "доза излучения" применяют в области ионизирующих излучений, в частности в медицинской радиологии и радиационной безопасности. В отличие от "дозы вещества", "доза излучения" является собирательным термином и имеет ряд вариантов с разным физическим смыслом. Ее современное понимание сложилось на основе длительного постепенного формирования представлений о механизмах взаимодействия ионизирующих излучений с облучаемым веществом. *В настоящее время различают четыре основные разновидности дозы излучения: экспозиционная, поглощенная, эквивалентная и эффективная* (доза на орган, ожидаемая эквивалентная доза или ожидаемая эффективная доза, коллективная доза). Термины "экспозиционная", "поглощенная", "эквивалентная", "эффективная" относятся к радиационным понятиям; они выражают определенную специ-

фику каждой разновидности дозы и указывают на то, что речь идет о дозе излучения.

Разные виды излучений сопровождаются высвобождением разного количества энергии и обладают разной проникающей способностью, поэтому они оказывают неодинаковое воздействие на ткани живого организма.

Альфа-излучение, которое представляет собой поток тяжелых частиц, состоящих из нейтронов и протонов, задерживается, например, листом бумаги (рис. 36) и практически не способно проникнуть через наружный слой кожи, образованный отмершими клетками. Поэтому оно не представляет опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие  $\alpha$ -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или с вдыхаемым воздухом; тогда они становятся чрезвычайно опасными.

Бета-излучение обладает большей проникающей способностью: оно проходит в ткани организма на глубину один - два сантиметра. Проникающая способность гамма-излучения, которое распространяется со скоростью света, очень велика: его может задержать лишь толстая свинцовая

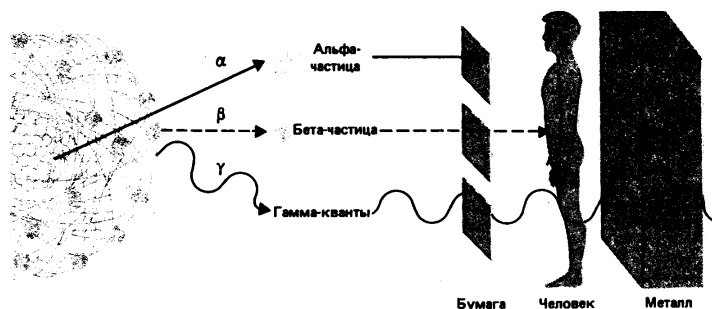


Рис. 36 Проникающая способность ионизирующих излучений [40].

или бетонная плита. Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям; количество такой переданной орга-

низму энергии называется дозой. Дозу излучения организм может получить от любого радионуклида или их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри его (в результате попадания с пищей, водой или воздухом).

Вопросы для самоконтроля.

1. Что может служить мерой вещества?
2. Что может служить мерой дозы излучения?
3. Назвать 4 основные разновидности дозы излучения.
4. Как зависит степень повреждения живых организмов от вида излучений?
5. Как зависит степень повреждения живых организмов от энергии излучения?

#### **4.1. Экспозиционная доза излучения**

Существуют два подхода к определению дозы излучения: один основан на его ионизационном, второй - на энергетическом действии.

Исторически первым был ионизационный принцип, которым пользовался В.К. Рентген в первых исследованиях открытых им X-лучей. Их количественной мерой служила степень ионизации воздуха, которую регистрировали с помощью электрометра. В честь В.К. Рентгена излучение назвали рентгеновским, его количественную меру - дозой рентгеновского излучения, а единица этой дозы получила название Рентген (Р).

Все виды ионизирующего излучения сами или опосредовано производят ионизацию атомов и молекул среды, затрачивая на этот процесс определенные порции своей энергии (ионизационные потери). Так как поглощенная энергия расходуется на ионизацию среды, то для измерения ее необходимо подсчитать число пар ионов, образующихся при излучении. Однако измерить ионизацию, например, непосредственно в глубине тканей живого организма очень трудно. В

связи с этим для количественной характеристики рентгеновского и гамма-излучения, действующего на объект, определяют так называемую экспозиционную дозу ( $D_{\text{экс}}$ ), которая характеризует ионизирующую способность рентгеновских и гамма-лучей в воздухе. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию излучения в определенной массе воздуха и только при энергии рентгеновских и гамма-лучей в диапазоне от десятков кэВ до 3 МэВ.

За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят кулон на килограмм (Кл/кг), то есть такая экспозиционная доза рентгеновских и гамма-лучей, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в килограмме сухого воздуха производит ионы, несущие заряд в один кулон электричества каждого знака.

На практике чаще применяется внесистемная (СГС - сантиметр, грамм, секунда) единица - рентген ( $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$  и  $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ ), принятая в 1928 году. Рентген (Р) - экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в  $1 \text{ см}^3$  воздуха (0,001293 г) при нормальных условиях ( $0^\circ\text{C}$  и 1013 гПа) создает ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу электричества каждого знака (заряд одного иона равен заряду электрона -  $4,8 \cdot 10^{-10}$  электростатической единицы).

При экспозиционной дозе равной 1 Р в 1 г воздуха образуется  $1,61 \cdot 10^{12}$  пар ионов (в 1 г биологической ткани -  $1,82 \cdot 10^{12}$  пар ионов). Производные единицы рентгена:

$$\begin{aligned} \text{килорентген (кР)} &= 10^3 \text{ Р}, \\ \text{миллорентген (мР)} &= 10^{-3} \text{ Р}, \\ \text{микрорентген (мкР)} &= 10^{-6} \text{ Р}. \end{aligned}$$

Используя вышеприведённые данные можно рассчитать ионизирующую способность рентгеновского или гамма-излучения при любой экспозиционной дозе и наоборот.

1 пример. Какое количество пар ионов в 1 г воздуха образуется при экспозиционной дозе 50 мР?

Решение. 1. Необходимо узнать, сколько Рентген составляет 50 мР.

Известно, что  $1 \text{ Р} = 10^3 \text{ мР}$ , следовательно,

$$x \text{ Р} = 50 \text{ мР}, \quad x \text{ Р} = 1 \text{ Р} \cdot 50 \text{ мР} / 10^3 \text{ мР}$$

таким образом,  $x = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Р}$ .

2. Необходимо узнать, какое количество пар ионов в 1 г воздуха образуется при экспозиционной дозе  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Р}$  (50 мР).

Так как при экспозиционной дозе равной 1 Р в 1 г воздуха образуется  $1,61 \cdot 10^{12}$  пар ионов, по пропорции вычислим какое количество пар ионов в 1 г воздуха образуется при экспозиционной дозе  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Р}$ .

$$1 \text{ Р} - 1,61 \cdot 10^{12} \text{ пар ионов/г воздуха}$$

$$5 \cdot 10^{-2} \text{ Р} - x \text{ пар ионов/г воздуха, следовательно,}$$

$$x = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ п. и./г воздуха}$$

2 пример. Чему равна экспозиционная доза, если в 1 г биологической ткани под действием гамма-излучения образуется  $3,64 \cdot 10^8$  п. и.?

Решение. Учитывая, что при экспозиционной дозе равной 1 Р в 1 г биологической ткани образуется  $1,82 \cdot 10^{12}$  пар ионов, вычисляем величину дозы, которая приводит к образованию  $3,64 \cdot 10^8$  п. и.

$$1,82 \cdot 10^{12} \text{ пар ионов} - 1 \text{ Р}$$

$$3,64 \cdot 10^8 \text{ п. и.} - x \text{ Р, следовательно, } x = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Р.}$$

Вопросы для самоконтроля.

1. В честь кого единицу экспозиционной дозы назвали Рентгеном?
2. Что принимают за единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ)?
3. Что является внесистемной единицей экспозиционной дозы (СГС)?
4. Рассчитать, какое количество пар ионов в 1 г воздуха (биологической ткани) образуется при экспозиционной дозе 50 мР, 2 мкР, 25 Р, 156 мР, 0,05Р?

5. Чему равна экспозиционная доза, если в 1 г воздуха (или биологической ткани) под действием гамма-излучения образуется  $3,6 \cdot 10^8$  п. и.,  $14 \cdot 10^{10}$  п. и., 20 п. и.,  $8 \cdot 10^{25}$  п. и.,?

#### 4.2. Поглощенная доза излучения

В результате воздействия излучений биологической среде живого организма передается определенная величина энергии. Часть поступающего излучения, которая пронизывает облучаемый объект (без поглощения), действия на него не оказывает (это, главным образом, нейтронное и гамма-излучение). Поэтому основная величина, характеризующая действие излучения на организм, находится в прямой зависимости от количества поглощенной энергии. Но рентген и выражаемая им экспозиционная доза излучения - это лишь мера падающего излучения. Величина "Рентген" ничего не говорит о количестве энергии излучения, поглощенного в самом объекте облучения. В начале 50-х годов стало очевидно, что единица Рентген не может обеспечить решение всех метрологических и практических задач в радиологии. Помимо нее, необходима универсальная (для любого вида ионизирующего излучения) единица, применяемая для определения физического эффекта облучения в любой среде, в частности в биологических тканях. Для измерения количества поглощенной энергии было введено понятие "**поглощенная**" доза излучения ( $D_n$ ) - **величина энергии, поглощенной в единице объема (массы) облучаемого вещества**. Различают поглощенную дозу в воздухе, дозу на поверхности (кожная доза) и в глубине облучаемого объекта (глубинная доза), очаговую и интегральную (общая поглощенная) дозы.

*Поглощенная доза ( $D_n$ ) - это величина, характеризующая энергию любого вида излучения, поглощенного в единице массы облученного вещества. Она основана на непосредственном измерении энергии, затраченной излучением*

**на ионизацию в веществе любого облучаемого объекта.** Так как средняя энергия образования пары ионов равна 34 эВ (2 - 60 эВ), то поглощенную дозу энергии излучения можно определять как произведение числа образуемых излучением пар ионов на среднюю работу ионизации. Следовательно, при экспозиционной дозе в 1 Р в 1 г воздуха затрачивается  $34 \text{ эВ/п.и.} \cdot 1,61 \cdot 10^{12} \text{ п.и./г} = 5,48 \cdot 10^7 \text{ МэВ}$  на образование ионов, а, учитывая, что  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$ , то  $5,48 \cdot 10^7 \text{ МэВ}$  составит  $87,6 \text{ эрг/г} \sim 88 \text{ эрг/г}$  - эту величину принято называть энергетическим эквивалентом рентгена, а в биологической ткани  $\sim 99 \text{ эрг/г}$  ( $34 \cdot 1,82 \cdot 10^{12}$ ). Таким образом, от экспозиционной дозы с помощью соответствующих энергетических эквивалентов переходят к дозе, поглощенной в объекте.

**Единицей поглощенной дозы является рад (rad – radiation absorbet dose)**, эта внесистемная международная единица поглощенной дозы, рекомендованная VII Международным конгрессом радиологов в 1953 году, получила широкое применение в практике. *Рад - единица поглощенной дозы излучения, при которой количество энергии, поглощенной в 1 г любого вещества, равно 100 эрг (1 рад = 100 эрг/г) независимо от вида и энергии ионизирующей радиации.*

В Международной системе единиц (СИ) за единицу поглощенной дозы принят джоуль на килограмм (Дж/кг), то есть такая поглощенная доза, при которой в 1 кг массы облученного вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Этой единице присвоено собственное наименование грей (Гр);  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ .

Введение единицы рад не исключает использование единицы измерения излучения в рентгенах. Единицей рентген пользуются для измерения поля излучения (или, как говорят радиологи, падающего излучения), для количественной характеристики источников квантового излучения.

Кроме того, безоговорочный переход к единице рад пока еще затруднен и технически, так как ранее выпущенная и используемая поныне дозиметрическая аппаратура отградуирована и в Р, и в рад. Поэтому при облучении биологических объектов дозу в воздухе по-прежнему измеряют в Р, а затем расчетным путем находят поглощенную дозу в рад. Поскольку доза излучения в 1 Р в воздухе энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощенная энергия в рад для воздуха составляет 0,88 рад (88/100). Следовательно, для воздуха при указанных выше условиях измерения поглощенная доза равна 0,88 рад, если доза излучения в воздухе равна 1 Р.

Поскольку при одной и той же энергии  $\gamma$ -квантов и частиц в 1 грамме разной по химическому составу биологической ткани поглощается различное количество энергии, поглощенную в тканях дозу измеряют в радах расчетным путем по формуле:  $D_{\text{рад}} = D_{\text{э}} \cdot f$ , где  $D_{\text{рад}}$  - поглощенная доза в радах;  $D_{\text{э}}$  - экспозиционная доза в рентгенах в той же точке;  $f$  - переходный коэффициент, величина которого зависит от энергии излучения и от рода поглощающей ткани (атомного номера и плотности).

Переходный коэффициент ( $f$ ) обычно определяют опытным путем на фантоме. Для воды и мягких тканей коэффициент ( $f$ ) округленно принят за единицу (для костной ткани имеет несколько меньшее значение, а для жировой, наоборот, большее, чем для мышечной ткани, и в среднем при пересчете Рентген в рад для любой биологической ткани фактически составляет 0,93). Следовательно, *поглощенная доза в радах численно почти равна соответствующей экспозиционной дозе в Рентгенах и при облучении дозой в 1 Р, измеренной в воздухе, биологическая ткань поглощает 0,93 рад*, так что по дозе излучения, измеренной в воздухе, можно судить о поглощенной дозе в биологической ткани.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что показывает поглощенная доза излучения?



2. На что расходуется поглощенная доза излучения?
3. Что принимают за единицу поглощенной дозы в Международной системе единиц (СИ)?
4. Что является внесистемной единицей поглощенной дозы (СГС)?
5. Рассчитать поглощенную дозу в воздухе (биологической ткани) при экспозиционной дозе 50 мР, 2 мкР, 25 Р, 156 мР, 0,05Р?
6. Чему равна поглощенная доза, если в 1 г воздуха (биологической ткани) под действием гамма-излучения образуется  $3,64 \cdot 10^8$  п. и.,  $14 \cdot 10^{10}$  п. и., 20 п. и.,  $8 \cdot 10^{25}$  п. и.,?
7. Чему равна поглощенная доза, если в 1 г среды поглощено 50 эрг/г (200 эрг/г, 20 эрг/г, 580 эрг/г,) энергии ионизирующего излучения?

### 4.3. Эквивалентная доза

При изучении корреляции между энергией, поглощенной единицей массы среды, и возникающим в результате этого биологическим эффектом выяснилось, что биологический эффект зависит не только от энергии, поглощенной единицей массы (от поглощенной дозы), но и от других факторов, например от вида излучений.

Однако применительно к биологическому действию различие в физической природе частиц не является главным фактором различия радиационных эффектов, так как все виды ионизирующей радиации сами или опосредовано вызывают поляризацию, возбуждение и ионизацию атомов среды. При этом свойства образованных излучением ионов не зависят от причины, по которой они возникли, а, следовательно, и от природы ионизирующих частиц. **Главное различие заключается в том, что разные виды излучений создают ионы с неодинаковым пространственным рас-**

**пределением.** Например, тяжелые заряженные частицы создают более плотное скопление ионов, чем легкие; различными оказываются диапазоны энергий, передаваемых вторичным частицам, которые по-своему влияют на пространственное распределение ионов. Так, удельная плотность ионизации, произведенная альфа-частицей, в  $10^4$  -  $10^5$  раз выше, чем, от гамма-квантов. Значительные различия обнаруживаются в микроскопическом распределении поглощенной энергии, а, следовательно, и ионизации. Особенности в пространственном распределении ионов при одной и той же поглощенной дозе приводят к различному биологическому эффекту.

Таким образом, в зависимости от вида и энергий излучений **определенный биологический эффект может быть достигнут неодинаковой поглощенной дозой**, что связано с пространственным распределением энергии в облучаемом объеме, то есть с линейной передачей энергии (ЛПЭ). Линейная передача энергии (ЛПЭ) служит для характеристики пространственного распределения переданной энергии. **В области противорадиационной защиты ЛПЭ является удобной характеристикой качества излучения.**

Для сравнения биологических эффектов, вызываемых разными видами излучения, используется также понятие относительной биологической эффективности (ОБЭ). *Относительная биологическая эффективность излучения - это отношение поглощенной дозы образцового излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе данного излучения, вызывающего тот же биологический эффект.* То есть, ОБЭ оценивают сравнением дозы изучаемого излучения, вызывающей определенный биологический эффект, с дозой стандартного излучения, обуславливающей тот же эффект. **Обычно, в качестве стандартного излучения используют жесткие рентгеновские лучи с энергией от 180 до 250 кэВ; для образцового излу-**

чения  $ОБЭ = 1$ . Чем выше удельная ионизация, тем больше коэффициент относительной биологической эффективности.

Таким образом, относительная биологическая эффективность - число, показывающее, во сколько раз биологическое действие (повреждающая способность) излучения данного вида и энергии больше биологического действия электромагнитного излучения при одной и той же поглощенной дозе в облучаемой биологической среде. ОБЭ гамма- и рентгеновского излучения принята за единицу и к ним приравнены оба бета-излучения, так как воздействие на ткани тех и других происходит за счет быстрых электронов.

Данные по ОБЭ, полученные в радиобиологических исследованиях, служат основой для установления предельно допустимых уровней облучения и норм радиационной безопасности. В целях противорадиационной защиты использовали, однако, не конкретное значение полученной в эксперименте ОБЭ а, чаще всего, так называемый коэффициент качества излучения. *Коэффициент качества (КК) учитывал различную эффективность отдельных видов излучения.* Было принято, что он зависит от переданной энергии, усредненной по длине трека (путь ионизирующей частицы) в определенной ткани. Поэтому величина КК, определена Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) как функция тормозной способности ( $L_{\infty}$ ), обусловленной столкновением заряженных частиц в воде. МКРЗ установила эту зависимость для некоторых значений  $L_{\infty}$ , как показано в табл. 7. Другие величины можно получить линейной интерполяцией.

Таблица 7.

Зависимость между ККи  $L_{\infty}$  [23]

$L_{\infty}$ , в воде (кэВ/мкм)	КК
$\leq 3,5$	1
7	2

23	5
53	10
$\geq 175$	20

Являясь основой при установлении норм, обеспечивающих радиационную безопасность, коэффициенты качества узаконивались ГОСТом и нормами радиационной безопасности (НРБ).

Помимо численных значений коэффициента качества для разных видов излучений устанавливается зависимость коэффициента качества от ЛПЭ излучения. Однако и в этом случае связь между коэффициентом качества и ЛПЭ устанавливается на основе обобщения и анализа данных по ОБЭ с учетом накопленных знаний по последствиям облучения, а не путем прямого наблюдения этой связи. В табл. 8 приведены средние значения ЛПЭ в воде, с которыми сопоставлены значения коэффициента качества (КК). Коэффициенты качества для промежуточных значений ЛПЭ находят линейным интерполированием.

Таблица 8.

Значения коэффициента качества для излучений с различными ЛПЭ [26]

Вид излучения	Средняя удельная ионизация в воде, пар ионов/мкм	Среднее значение ЛПЭ в воде, кэВ/мкм	Коэффициент качества
Фотонное излучение; электроны, позитроны	$\leq 100$	$\leq 3,5$	1
Тяжелые ионизирующие частицы	$\leq 100$	$\leq 3,5$	1
	100 - 200	3,5 - 7,0	1 - 2
	200 - 650	7,0 - 23	2 - 5

	650 - 1500	23 - 53	5 - 10
	1500 - 5000	53 - 175	10 - 20

Принято, что излучения с одинаковым коэффициентом качества при равных дозах и одинаковых условиях облучения приводят к одинаковому биологическому эффекту с точки зрения радиационной опасности. **Коэффициент качества - это зависящий от ЛПЭ коэффициент, на который надо умножить поглощенную дозу, чтобы для целей противорадиационной защиты биологический эффект облучения выражался в одной и той же мере независимо от вида излучения.** В упрощенном виде можно пользоваться данными, представленными в таблице 9.

*Коэффициенты качества были выбраны так, чтобы соответствовать эффективности различных типов ионизирующих излучений по степени вызываемых ими вредных эффектов **при низких дозах.*** Поэтому важно иметь в виду, что не следует использовать эквивалентную дозу для оценки всех возможных последствий аварийного облучения живых организмов, при которых могут иметь место тяжелые эффекты.

Таблица 9.

Рекомендованные допустимые приближенные значения КК для различных видов излучений [23]

Вид излучения	Приблизительное значение КК
Рентгеновское, $\gamma$ -излучение или электроны	1
Тепловые нейтроны	2,3
Нейтроны, протоны, однозарядные частицы с массой покоя больше чем 1 единица атомной массы с неизвестной энергией	10
$\alpha$ -частицы и многозарядные частицы (и частицы с неизвестным зарядом) с неизвестной энергией	20

Для установления четкой численной зависимости между измеряемой величиной, описывающей радиационное воздействие, и биологическим эффектом Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ), использовала величину **"эквивалентная доза"**, назначение которой - в достаточной мере отражать биологическую эффективность радиационного воздействия при тех уровнях поглощенных доз, с которыми обычно имеют дело в радиационной защите.

Опубликованные "нормы радиационной безопасности НРБ-96" определяют **"эквивалентную дозу"** как **произведение поглощенной дозы на взвешивающий радиационный коэффициент (ВРК) для данного вида излучения**, а не на коэффициент качества, как это было в НРБ-76/87, в этом документе указаны дискретные значения взвешивающих коэффициентов для всех видов излучений. Взвешивающие радиационные коэффициенты приняты равными: 1 - для фотонов, электронов и мюонов любых энергий; 5 - для протонов с  $E > 2$  МэВ (кроме протонов отдачи), нейтронов с  $E < 10$  кэВ и  $E > 20$  МэВ; 10 - для нейтронов с энергиями 10 - 100 кэВ и 2 - 20 МэВ; 20 - для нейтронов с энергиями 100 кэВ - 2 МэВ, альфа-частиц, осколков деления и тяжелых ядер. Для смешанного излучения эквивалентную дозу определяют как сумму произведений значений поглощенной дозы отдельных видов излучений на соответствующие значения взвешивающих коэффициентов для этих излучений.

Величина эквивалентной дозы в СИ измеряется в тех же единицах, что и поглощенная доза, а именно Дж/кг, но во избежание путаницы она получила специальное наименование Зиверт (Зв) - по имени шведского ученого Р. Зиверта - первого председателя МКРЗ, созданной в 1928 году. Зиверт связан с внесистемной единицей эквивалентной дозы бэр (биологический эквивалент Рентгена) следующим соот-

ношением:  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ . 1 бэр равен поглощенной дозе любого вида излучения, которое создает в организме такой же биологический эффект, что и 1 рад рентгеновского и гамма-излучения с энергией квантов около 0,2 МэВ.

Пример. Рассчитать поглощенную и эквивалентную дозу от смешанного источника излучения, если доза составляла от гамма-излучения 1 рад, бета-излучения – 0,10 Гр, альфа-излучения - 1 рад и от быстрых нейтронов - 1 рад.

Решение:

$$\sum D_{\text{п}} = 1 + 10 + 1 + 1 = 13 \text{ рад};$$

$$\sum D_{\text{экв}} = 1 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 20 + 1 \cdot 10 = 41 \text{ бэр}.$$

Следовательно, суммарная эквивалентная доза оказывается в три с лишним раза больше поглощенной (физической).

Вопросы для самоконтроля.

1. В чем состоит главное различие действия на биологическую ткань альфа, бета и гамма излучений?
2. Как различаются по ЛПЭ альфа, бета, гамма и нейтронное излучения?
3. Что характеризует и как рассчитывается ОБЭ излучения?
4. Что используют в качестве стандартного ионизирующего излучения?
5. От чего зависит КК излучения?
6. Для чего введено понятие «эквивалентная доза»?
7. Чему равны ВРК для разных излучений?
8. Как рассчитывается эквивалентная доза и в каких единицах измеряется?
9. За год эквивалентная доза составила 6 Зв: поглощенная доза от альфа-излучения равнялась 1 рад, от излучения цезия-137 – 0,03 Гр, остальное от радиационного фона. Определить величину Р.Ф.

10. За год человеком получена от гамма-излучения эквивалентная доза равная  $1 \cdot 10^{-2}$  Зв. Рассчитать радиационный гамма-фон местности, где проживает этот человек.
11. Эквивалентная доза от радиационного фона равна 2 Зв/год. Какое количество пар ионов образуется каждый час в 1 г биологической ткани под действием этого излучения?
12. В каждом грамме тела человека, постоянно проживающего в селе X., под действием радиационного гамма-фона за 1 час образуется  $1,82 \cdot 10^6$  пар ионов. Рассчитать радиационный гамма-фон в селе X и эквивалентную дозу за год от этого излучения.
5. За год эквивалентная доза составила 0,7 Зв: поглощенная доза от альфа-излучения равнялась 2 рад, от излучения иода-131 – 0,05 Гр, остальное от радиационного фона. Определить величину Р.Ф..
6. При нейтронном облучении с энергией 2,2 Мэв в 1 г биологической ткани поглощено 0,02 Гр. Рассчитать полученную эквивалентную дозу.
7. За год эквивалентная доза составила 0,8 Зв: поглощенная доза от излучения радия-226 равнялась 0.03 Гр, от излучения стронция-90 – 3 рад, остальное от радиационного фона. Определить величину Р.Ф.
8. При альфа облучении в 1 г биологической ткани поглощено 50 эрг. Рассчитать эквивалентную дозу.
9. В каждом грамме тела человека, постоянно проживающего в селе X., за 1 час образуется  $3,64 \cdot 10^3$  пар ионов. Рассчитать радиационный фон.
10. При облучении радием-226 в 1 г биологической ткани поглощено 350 эрг. Рассчитать эквивалентную и поглощенную дозы.
11. Эквивалентная доза от радиационного фона равна 5 Зв/год. Какое количество пар ионов образуется каждый час в 1 г биологической ткани под действием этого излучения?



#### 4.4 Стохастические и нестохастические эффекты

В радиобиологии различают стохастические (вероятностные) и нестохастические (закономерные, детерминированные) эффекты.

Прямая четкая корреляция между облучением и наблюдаемым эффектом у отдельного облученного организма отмечается только для таких последствий воздействия поглощенных доз, которые характеризуются **определённым порогом поглощенных доз**, ниже которого они не возникают (в пределах нормальной индивидуальной устойчивости). С увеличением дозы возрастает и степень поражения. Такими эффектами, например, являются эритема (покраснение кожи), лучевой ожог, лучевая болезнь, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода. **Эти эффекты получили название закономерные** (детерминистские, нестохастические эффекты или тканевые реакции - ТР). Пороговой величиной дозы для временного бесплодия у мужчины при однократном облучении является поглощенная доза на тестикулы около 0,15 Гр, а в условиях длительного облучения — 0,4 Гр/год. Соответствующие значения для стойкого бесплодия равны 3,5-6 Гр при остром облучении и 2 Гр/год при длительном облучении. Пороговой величиной для стойкого бесплодия у женщин является величина острой поглощенной дозы в пределах 2,5-6 Гр при однократном облучении или длительное облучение в течение многих лет дозой, которая превышает приблизительно 0,22 Гр/год.

Для клинически значимого угнетения кроветворного процесса в костном мозге пороговая поглощенная доза при однократном облучении составляет около 0,5 Гр; при длительном облучении в течение многих лет она составляет более 0,4 Гр/год. При отсутствии медицинской помощи доза, которая вызовет смерть половины облученных лиц в тече-

ние 60 дней в результате угнетения костного мозга в неоднородной группе населения при однократном облучении, равняется примерно 3-5 Гр.

Пороговая величина, которая через некоторое время вызывает помутнение хрусталика и приводит к ухудшению зрения, видимо, составляет 2-10 Гр при однократном рентгеновском и гамма-облучении, при многолетнем облучении - 0,15 Гр/год. Недавние исследования показали, что хрусталик глаза может быть более радиочувствительным, чем считалось ранее (до 0,5 Гр).

Детерминистские последствия наблюдались в результате атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки и приблизительно ста аварий, связанных с радиационными источниками, которые были зарегистрированы за последние годы. Эти события послужили подтверждением характера детерминистских последствий для здоровья людей, получивших очень высокие дозы. Смертельный исход неизбежен, если человек получает дозу на все тело около 6 Гр и выше в течение короткого периода времени. Дозы, равные приблизительно 3 Гр, могут быть летальными для примерно половины людей из числа облученного контингента населения, получившего лечение в недостаточном объеме или не получившего его вообще (средняя летальная доза). Для здоровых людей, получающих нормальное лечение, средняя летальная доза может составлять 5 Гр и достигать 9 Гр при очень интенсивном лечении. При дозах ниже 1 Гр вероятность детерминистских (тканевых реакций) последствий практически равна нулю.

Для другого класса эффектов, таких, как злокачественные опухоли, наследственные болезни наличие пороговой дозы не установлено. Однако известно, что если облучению подвергалась группа людей, то у определенной их части возникнет этот эффект, но в настоящее время не существует способа предсказать, у кого из индивидуумов он проявится. Поэтому можно считать, что для каждого индивидуума уве-

личение облучения приводит к возрастанию вероятности того, что эффект возникнет. **Эти эффекты получили название стохастические (вероятностные).** Для радиационной защиты принято, что риск возникновения стохастических эффектов при облучении тканей прямо пропорционален поглощенной в ткани дозе.

Степень тяжести стохастических эффектов не зависит от дозы облучения, что отличает их от тканевых реакций (ТР), но при увеличении дозы частота возникновения этих эффектов возрастает.

Могут потребоваться годы и даже десятки лет, прежде чем последствие изменения клеток можно биостатистически обнаружить (и эпидемиологически подтвердить) в виде увеличения числа злокачественных новообразований или серьезных наследственных отклонений в большой группе населения (а не у отдельных людей). Согласно современной радиобиологической теории процесс, ведущий к возникновению стохастического последствия облучения, может начаться при любой дозе, какой бы малой она не была; при этом вероятность заболевания пропорциональна полученной дозе. Эта модель называется линейной зависимостью "доза-эффект" без порогового значения.

Дозы облучения, полученные населением в результате аварии в Чернобыле, могут привести только к стохастическим последствиям, таким, как соматический канцерогенез и наследственные последствия облучения.

Вопросы для самоконтроля.

1. Как называются радиобиологические эффекты, развивающиеся при получении определенной дозы облучения (пороговой дозы)?
2. Чему равна величина пороговой дозы на тестикулы при однократном облучении для развития временного бесплодия у мужчины?

3. Чему равна величина пороговой дозы на тестикулы при однократном облучении для развития стойкого бесплодия?
4. Чему равна величина пороговой дозы на яичники для развития стойкого бесплодия у женщин?
5. Как называются радиобиологические эффекты, возникающие при сколь угодно малой дозе (не имеющие порога дозы)?
6. Чему равна величина пороговой дозы для клинически значимого угнетения кроветворного процесса в костном мозге при однократном облучении?
7. Чему равна величина пороговой дозы для клинически значимого угнетения кроветворного процесса в костном мозге при длительном облучении в течение многих лет?
8. Чему равна величина пороговой дозы для помутнения хрусталика при однократном облучении?
9. Чему равна величина пороговой дозы для помутнения хрусталика при длительном облучении в течение многих лет?

#### **4.5. Эффективная эквивалентная доза**

Для целей радиационной защиты принято, что вероятность возникновения стохастического (вероятного) эффекта в органе или ткани пропорциональна эквивалентной дозе в органе или ткани. Константа пропорциональности различается для разных тканей организма, но при оценке ущерба для здоровья обычно требуется определить общий риск. Если облучение равномерно по всем тканям организма, можно использовать один общий коэффициент риска (1) и делать оценки и сравнения для всего организма только на основе эквивалентной дозы. Однако в том случае, когда облучение разных тканей неоднородно, что обычно для облучения от

большинства инкорпорированных радионуклидов, необходима еще одна величина для того, чтобы определить общий риск.

Следует учитывать также, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны, чем другие: например, при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому *дозы облучения органов и тканей также следует учитывать с разными коэффициентами*. Числовые значения взвешивающих коэффициентов устанавливаются на основе коэффициентов риска, которые в свою очередь выводятся из данных радиобиологических и медицинских исследований. "Нормы радиационной безопасности НРБ-96" предусматривают, что "эффективная доза" учитывает неравномерность облучения путем суммирования произведений эквивалентной дозы на взвешивающий тканевой коэффициент по 13 органам или тканям, условно представляющим все тело человека. Взвешивающие тканевые коэффициенты составляют: 0,2 - для гонад; 0,12 - для красного костного мозга, нижнего отдела толстого кишечника, легких и желудка; 0,05 - для молочной и щитовидной желез, мочевого пузыря, печени и пищевода; 0,01 - для кожи и поверхности костей. Приведенная величина для гонад учитывает серьезные наследственные эффекты, сказывающиеся в первых двух поколениях. Для суммы всех остальных органов и тканей (надпочечники, головной мозг, верхний отдел толстого кишечника, тонкий кишечник, почки, мышечная ткань, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа, матка) принят коэффициент 0,05.

Последние основные рекомендации (Публикация 103) Международной Комиссии по Радиологической защите (МКРЗ) базируются на данных, опубликованных с 1990 г. и по настоящее время и представляют современные оценки значений тканевых весовых множителей (табл.10).

Понятие эффективной эквивалентной дозы ввела МКРЗ в качестве меры радиационного воздействия на живой организм. *Эффективная доза - это сумма эквивалентных доз в наиболее важных органах со своими (регламентированными) взвешивающими тканевыми коэффициентами ( $W_T$ ,  $w_T$ ), характеризующими относительный вред от стохастических эффектов облучения отдельных органов.*

Таблица 10

Рекомендованные значения тканевых весовых множителей ( $W_T$ ,  $w_T$ )

Ткань	$W_T$	$\sum w_T$
Костный мозг (красный), толстая кишка, легкие, желудок, молочная железа, остальные ткани*	0.12	0.72
Гонады	0.08	0.08
Мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа	0.04	0.16
Поверхность кости, головной мозг, слюнные железы, кожа	0.01	0.04
Итого		1.00

Примечание. \* Остальные ткани: надпочечники, экстрагепатическая область, желчный пузырь, сердце, почки, лимфоузлы, мышцы, слизистая рта, поджелудочная железа, простата, тонкий кишечник, селезенка, тимус, матка/шейка матки.

Таким образом, эквивалентная доза - это поглощенная доза, умноженная на коэффициент ( $W_T$ ), отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма, а эффективная эквивалентная доза - эквивалентная доза, умноженная на коэффициент ( $w_T$ ), учитывающий разную чувствительность конкретных тканей к облучению. Эффективная эквивалентная доза отражает суммарный эф-

фekt облучения для организма; она также измеряется в Зивертах.

Пример. Рассчитать эффективную эквивалентную дозу от мягкого  $\beta$ -облучения кожи при поглощенной дозе 20 рад и  $\alpha$ -облучения красного костного мозга при поглощенной дозе 0,03 Гр.

1. Так как эффективная эквивалентная доза рассчитывается по формуле:  $D_{\text{эф.экв}} = D_{\text{экв}} \times \text{ВТК}$ , где  $D_{\text{эф.экв}}$  - эффективная эквивалентная доза;  $D_{\text{экв}}$  - эквивалентная доза;  $\times$  - знак умножения; ВТК - взвешивающий тканевый коэффициент ( $w_T$ ), то в первую очередь определяем  $D_{\text{экв}}$ , которая равна произведению поглощенной дозы ( $D_p$ ) на взвешивающий радиационный коэффициент.

$D_{\text{экв}}$  для кожи = 20 рад  $\times$  1 = 20 бэр (0,2 Зв);

$D_{\text{экв}}$  для красного костного мозга = 0,3 Зв  $\times$  20 = 6 Зв (600 бэр).

2. Вычислив  $D_{\text{экв}}$  для кожи (20 бэр) и для красного костного мозга (600 бэр) и, зная ВТК ( $w_T$ ) для этих тканей, можно рассчитать полученную ими эффективную эквивалентную дозу:

$D_{\text{эф.экв}}$  для кожи = 20 бэр  $\times$  0,01 = 0,20 бэр;

$D_{\text{эф.экв}}$  для красного костного мозга = 600 бэр  $\times$  0,12 = 72 бэр.

Общая эффективная эквивалентная доза будет равна (0,20 бэр + 72 бэр. = 72,2 бэр).

При оценке эффективной эквивалентной дозы в принципе не важно, формируется ли эквивалентная доза в какой-либо ткани от внутреннего или внешнего облучения. Нужно всего лишь оценить эквивалентную дозу в каждой ткани от всех источников, умножить на соответствующие коэффици-

енты и сложить результаты. Если все ткани организма были облучены равномерно, то результат будет численно равен эквивалентной дозе для всего организма. Тем не менее, во многих практических ситуациях проще отдельно оценить вклад от внутреннего и внешнего облучения.

Общую годовую эффективную эквивалентную дозу получают суммированием эффективной дозы от внешнего облучения с "ожидаемыми" эффективными дозами внутреннего облучения от каждого радионуклида. Таким образом, *годовая эффективная эквивалентная доза облучения равна сумме эффективной дозы внешнего облучения, накопленной за календарный год, и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов, за этот же период.*

Эффективная эквивалентная доза, оставаясь дозиметрической величиной, является показателем риска гибели от соматических эффектов и риска появления наследственных эффектов в первых двух поколениях, которые, по определению, возникают в результате воздействия любого вида излучения, как однородного, так и неоднородного, как от внешних, так и от внутренних источников. При этом не учитываются наследственные изменения, возникающие в последующих поколениях, а также несмертельные соматические эффекты, такие, как большинство случаев рака щитовидной железы или кожи. *Концепция эффективной эквивалентной дозы в аспекте радиационной безопасности исходит из признания линейной беспороговой модели радиационного действия.*

Вопросы для самоконтроля.

1. Одинаков ли риск появления стохастических эффектов для разных тканей?
2. На основе чего устанавливаются числовые значения взвешивающих тканевых коэффициентов для разных тканей?



3. Дать определение эффективной эквивалентной дозы.
4. Чем отличается эквивалентная доза от эффективной эквивалентной дозы?
5. Как рассчитывают общую годовую эффективную эквивалентную дозу?

#### 4.6. Мощность дозы

В биологическом отношении важно знать не просто дозу излучения, которую получил облучаемый объект, а дозу, полученную в единицу времени, так как фактор времени далеко не безразличен для биологического лучевого эффекта. В одном случае суммарная доза, значительно превышающая смертельную, но полученная в течение длительного периода времени, не только не приведет к гибели животного, но даже не вызовет у него реакцию лучевого поражения. В другом случае, - доза меньше смертельной, но полученная в короткий отрезок времени может вызвать лучевую болезнь различной тяжести. В этой связи введено понятие мощности дозы. *Мощность дозы (R) - это доза излучения (D), отнесенная к единице времени (t):  $R = D / t$ .* Чем больше мощность дозы (R), тем быстрее растет доза излучения (D). *Мощность дозы - приращение дозы в единицу времени.* Она характеризует скорость накопления дозы и может увеличиваться или уменьшаться со временем.

Понятие мощности дозы относится как к экспозиционной, поглощенной, эквивалентной так и к эффективной эквивалентной дозе. Для экспозиционной дозы системная единица - ампер на килограмм (А/кг), внесистемная - рентген в час (Р/ч), рентген в минуту (Р/мин) или микрорентген в час (мкР/ч) (в мкР/ч обычно выражают "радиационный фон"); для поглощенной дозы соответственно - рад в час (рад/ч), рад в минуту (рад/мин), Гр/год (Грей в год) и так далее; для эквивалентной дозы чаще используют соотношение бэр/год, Зв/год (Зиверт в год). Эквивалентные дозы острого

облучения менее 1 Зв, или протяженного облучения мощностью 0,1 Зв/год и ниже (при условии, что доза, полученная на протяжении жизни, не превзойдет 1 Зв) рассматриваются как низкие (о них принято также говорить, как о низких уровнях облучения).

Установление стандартов защиты человека и биоты должно достигаться без неоправданного ограничения тех рациональных видов деятельности и образа жизни, которые ведут к облучению или к повышению его дозы. Отправной точкой при выборе уровней, для которых устанавливаются те или иные ограничения, может быть озабоченность, связанная с облучением в дозе, близкой к годовой эффективной дозе от всех естественных источников, включая радон, которая, по данным «Отчета НКДАР-2000», равна 2,4 мЗв.

Тот факт, что эффективная доза от естественного фона в глобальных масштабах различается примерно в 10 раз и более, поддерживает точку зрения, согласно которой озабоченность должна быть повышенной, начиная с верхней границы природного фона.

Ниже приведены уровни озабоченности опасностью облучения при разных индивидуальных эффективных годовых дозах (табл. 11). Согласно ожидаемым оценкам, уже при индивидуальной эффективной дозе, превышающей 100 мЗв/год, риск от источника излучения не может считаться оправданным, за исключением чрезвычайных случаев, например при спасении жизни во время аварий или в пилотируемых космических аппаратах.

Таблица 11

## Уровни озабоченности опасностью облучения

Уровень озабоченности	Индивидуальная эффективная доза за год
Высокий	Более 100 мЗв
Повышенный	Более нескольких десятков

	мЗв
Низкий	1 — 10 мЗв
Очень низкий	Менее 1 мЗв
Нет озабоченности опасностью облучения	Менее 0,01 мЗв

Индивидуальные дозы около 500 мЗв при остром облучении могут вызвать ранние детерминированные эффекты или значительно повысить вероятность возникновения онкологических заболеваний как при остром облучении, так и в случае, если радиационное воздействие в этой дозе охватывает несколько десятков лет.

Однако при облучении в медицинских целях ограничение дозы для отдельного пациента не рекомендуется, если оно принесет больше вреда, чем пользы, вследствие снижения эффективности диагностики или лечения.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что вызовет больший повреждающий эффект биологической ткани – высокая дозы облучения за короткий промежуток времени или такая же доза, но за длительное время?
2. Мощность какой дозы выражается в Р/год, Зв/год, рад/мин?
3. В каких единицах измерения выражают величину радиационного фона?
4. Во сколько раз различается эффективная доза от естественного фона в глобальных масштабах?
5. С какого уровня озабоченность опасностью облучения должна быть повышенной?

#### **4.7. Соотношение между дозой, создаваемой гамма-излучением радиоактивных препаратов и их активностью**

При гамма-облучении биологических объектов (например, при радиостерилизации и других видах прикладного использования биологического действия ионизирующих излучений) важно знать не активность источника излучения, выраженную в кюри, а мощность дозы гамма-излучения, которая создается комбинированными излучателями при определенных условиях. Например,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  после основного электронного распада часто превращаются в дочерние ядра с избытком энергии, которые выделяют гамма-кванты в процессе изомерного перехода.

Для сравнения мощности дозы от различных источников  $\gamma$ -излучения в качестве эталона используется точечный источник радия активностью 1 мКи с фильтром из платины толщиной 0,5 мм, находящийся в равновесии со своими продуктами распада и создающий на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы, равную 8,4 Р/ч. Активность любого радионуклида, создающая такую же мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения, как и 1 мг (1 мКи) радия, при равных условиях измерения называется миллиграмм-эквивалентом радия. *Таким образом, ионизационное действие  $\gamma$ -излучения любого радионуклида оценивается сравнением его с ионизационным действием радиевого эталонного источника при одинаковых условиях измерения и выражается в миллиграмм-эквивалентах радия (мг-экв Ra) или грамм-эквивалентах радия (г-экв Ra).*

Для измерения гамма-излучения пользуются также гамма-эквивалент. Гамма-эквивалент - это мера количества радиоактивного препарата, основанная на сравнении его гамма-излучения с гамма-излучением препарата радия. *Гамма-эквивалент любого радиоактивного препарата показывает, какому весовому количеству радия эквивалентен данный препарат по своему гамма-излучению в идентичных условиях измерения.* За эталонный источник гамма-излучения, как уже сказано выше, принят 1 мг  $^{226}\text{Ra}$ , находящийся в равно-

весии со своими короткоживущими продуктами распада. Таким образом, гамма-эквивалент характеризует лишь ионизационную способность гамма-излучения, выходящего из данного препарата, определенную путем сравнения с эталонным радиевым источником при строго идентичных условиях измерения.

Для перехода от единиц активности к гамма-эквиваленту (М) вводится понятие о гамма-постоянной.

*Гамма-постоянная ( $K_\gamma$ ) - это мощность дозы гамма-излучения (в Р/час) от гамма-источника с активностью 1 мКи, создаваемая в воздухе на расстоянии 1 см от точечного источника.* Источник называется точечным, если доза или интенсивность излучения в данной точке изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Источник можно считать точечным, если его линейные размеры в 5 - 10 раз меньше расстояния, на котором измеряют дозы.

Как уже было указано, точечный источник в 1 мг Ra, находящийся в равновесии со своими дочерними продуктами, после начальной фильтрации через платиновый фильтр толщиной 0,5 мм создает на расстоянии 1 см в воздухе мощность дозы 8,4 Р/час. При тех же условиях измерения, но без начальной фильтрации мощность дозы от 1 мг Ra несколько выше - 9,53 Р/час. Фильтр (0,5 мм Р1) в виде герметически закрытого футляра задерживает дочерний продукт радон и полностью поглощает альфа- и бета-излучение смеси Ra с его дочерними продуктами, но одновременно ослабляет сопутствующее распаду  $\gamma$ -излучение примерно на 10%.

Таблица 12.

Гамма-постоянные ( $K_\gamma$ ) и  $\gamma$ -активность 1 мКи некоторых радионуклидов при нулевом начальном фильтре [12]

Радионуклид	Полная гамма-	Гамма-активность	Радионуклид	Полная гамма-	Гамма-актив-

	постоянная (Кγ) (Р/час)	1 мКи (м) (мг-экв Ra)		постоянная (Кγ) (Р/час}	ность 1 мКи (м) (мг-экв Ra)
<sup>40</sup> K	0,86	0,10	<sup>103</sup> Ru+	2,85	0,34
<sup>60</sup> Co	13,20	1,57	<sup>103m</sup> Rh		
			<sup>131</sup> J+	2,30	0,27
<sup>59</sup> Fe	6,25	0,74	<sup>131m</sup> Xe		
			<sup>137</sup> Cs+	3,55	0,42
<sup>65</sup> Zп	2,83	0,34	<sup>137m</sup> Ba		
<sup>95</sup> Zг+	4,22	0,50	<sup>140</sup> Ba	1,36	0,16
<sup>95m</sup> Nb			<sup>144</sup> Ce	0,175	0,02)

Итак, за эталон, характеризующий гамма-излучение, принята мощность дозы излучения 8,4 Р/час. С этой величиной сравнивается Кγ всех других γ-излучателей, полученных без начальной фильтрации излучения, то есть без потерь при фильтрации.

Такая мощность дозы излучения называется полной гамма-постоянной, тогда как 8,4 Р/час есть гамма-постоянная Ra при платиновом фильтре в 0,5 мм и ее надо обозначить как Кγ (0,5; Pl). Отношение Кγ любого γ-активного радионуклида к 8,4 (Кγ/8,4) - или, другими словами, гамма-активность 1 мКюри радионуклида, выраженная в мг-эквRa, позволяет судить об относительной жесткости γ-излучения данного радионуклида по сравнению с эталонной жесткостью γ-излучения равного количества Ra. Отношение Кγ/8,4 принято обозначать также как коэффициент m.

Полные гамма-постоянные и γ-активность 1 мКи в мг-экв. Ra основных γ-активных продуктов деления <sup>235</sup>U и некоторых продуктов активации приводятся в табл. 10.

Переход от активности (Q) данного радионуклида к его γ-эквиваленту (M), то есть соотношение между единицами Кюри и мг-экв. Ra, устанавливается по табличным данным о

$K\gamma$  (или по гамма активности 1 мКи - коэффициенту  $m$ ) по формуле:

$$M = K\gamma \cdot Q/8,4 \text{ или } M = m \cdot Q.$$

Пример. Определить, какому количеству мг-экв Ra соответствует (эквивалентно) гамма-излучение 2 мКюри  $^{131}\text{I}$ . По таблице  $K\gamma \cdot ^{131}\text{I} = 2,30$ , а  $m = 0,27$ . Следовательно:

$$M = 2,30 \cdot 2/8,4 \text{ или } (M = 0,27 \cdot 2) = 0,54 \text{ мг} \cdot \text{экв Ra}.$$

В обратном случае, то есть для перехода от известного  $\gamma$ -эквивалента ( $M$ ) к активности ( $Q$ ), можно воспользоваться формулой:

$$Q = M \cdot 8,4 / K\gamma.$$

Доза излучения любого точечного  $\gamma$ -источника за определенный промежуток времени и на определенном расстоянии от источника может быть вычислена, если учитывается ослабление интенсивности излучения с расстоянием. Известно, что интенсивность излучения в расходящемся пучке квантов от точечного источника изменяется подобно интенсивности видимых световых лучей - обратно пропорционально квадрату расстояния ( $r$ ).

Чтобы вычислить дозу излучения  $D_3$  (в Рентгенах), создаваемую за время  $t$  (часов) на расстоянии ( $r$ , см) точечным  $\gamma$ -источником с активностью  $Q$  (мКи), надо предварительно  $Q$  перевести в  $M$  (в мг-эквRa), после чего вычисления производят по формуле:

$$D_3 = 8,4 \cdot M \cdot t/r^2.$$

Пример 1. Определить дозу  $\gamma$ -излучения, создаваемую препаратом  $^{60}\text{Co}$  активностью 0,5 кюри (500 мКи) на расстоянии 120 см за 2 часа.

Решение:

Сначала, пользуясь коэффициентом  $m$  для  $^{60}\text{Co}$  (табл. 10), по формуле ( $M = m \cdot Q$ ) находим, чему равен  $\gamma$ -эквивалент 500 мКи  $^{60}\text{Co}$  (в мг-эквRa):

$$M = 1,57 \cdot 500 = 785 \text{ мг-эквRa}.$$

Затем, вычисляем дозу излучения  $D_3$  (в Рентгенах), создаваемую за время  $t$  (часов) на расстоянии ( $r$ , см) точечным  $\gamma$ -источником, подставляя в формулу найденный гамма-эквивалент:

$$D_3 = 8,4 \cdot 785 \cdot 2/120^2 = 0,91 \text{ Р.}$$

Мощность дозы излучения данного количества  $^{60}\text{Co}$  составляет:  $\dot{P} = D_3/t = 0,91/2 = 0,45 \text{ Р/час.}$

Если вместо активности приводится уже известный гамма-эквивалент радиоактивного изотопа ( $M$  - мг-экв Ra), то экспозиционная доза сразу рассчитывается по формуле:

$$D_3 = 8,4 \cdot M \cdot t/r^2.$$

Пример 2. На рабочем месте имеется радиоактивный препарат  $^{60}\text{Co}$  активностью 10 мг-экв Ra. Какую дозу получит работающий на расстоянии 0,5 м за 6 дней, если будет работать по 30 мин ежедневно.

Решение:

$$D_3 = 8,4 \cdot M \cdot t/r^2 = 8,4 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 6/50^2 = 0,1 \text{ Р}$$

Таким образом, работающий на этом месте за указанное время получит от гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  экспозиционную дозу 0,1 Рентген

Вопросы для самоконтроля.

1. Что используется в качестве эталона для сравнения мощности дозы от различных источников  $\gamma$ -излучения?
2. Что называется миллиграмм-эквивалентом радия?
3. Что показывает гамма-эквивалент радиоактивного препарата?
4. В каких единицах измеряется гамма-постоянная ( $K_\gamma$ )?
5. Как изменяется интенсивность электромагнитного излучения от точечного источника излучения в зависимости от расстояния?
6. Чему равна гамма-постоянная ( $K_\gamma$ )  $^{40}\text{K}$ ,  $^{131}\text{J}$ +( $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ),  $^{137}\text{Cs}$ +( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ )?





## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Физические постоянные.

Скорость света:  $c = 2,99776 \cdot 10^{10}$  см/сек

Квант действия (постоянная Планка):  $h = 6,623 \cdot 10^{-27}$  эрг/сек.

Число атомов в грамм-атоме (грамм-молекуле):  $N_A = 6,0247 \cdot 10^{23}$  - число Авогадро

Число атомов в 1 г вещества:  $N = 6,0247 \cdot 10^{23} / A$ , где  $A$  - атомный вес

Атомная единица массы: 1 АЕМ -  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г или 931,162 МэВ

Заряд электрона:  $e = 4,802 \cdot 10^{-10}$  электростатических единиц заряда ( $1,6 \cdot 10^{-19}$ )

Масса покоя электрона:  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг

Энергия покоя электрона:  $m_e c^2 = 5,1079 \cdot 10^5$  эв или 0,51079 МэВ

Масса протона:  $m_p = 1,6724 \cdot 10^{-27}$  кг

Масса нейтрона:  $m_n = 1,6746 \cdot 10^{-27}$  кг

### Единицы измерений

Ангстрем: 1 А =  $10^{-8}$  см

Ферми: 1 ферми =  $10^{-13}$  см

Электронвольт: 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг

Килоэлектронвольт: 1 кэВ =  $10^3$  эВ =  $1,6 \cdot 10^{-9}$  эрг

Мегаэлектронвольт: 1 МэВ =  $10^6$  эВ =  $1,6 \cdot 10^{-6}$  эрг

Активность - кюри: 1 Ки =  $3,716916910^{10}$  расп/сек (или 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк)

Таблица 1.

Некоторые приставки для преобразования внесистемных единиц в систему СИ.

Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение	Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение
Атто...	$10^{-19}$	а	Деци...	$10^{-1}$	д
Фемто...	$10^{-15}$	Ф	Дека...	$10^1$	дк
Пико...	$10^{-12}$	п	Гекто...	$10^2$	г
Нано...	$10^{-9}$	н	Кило...	$10^3$	к
Микро...	$10^{-6}$	мк	Мега...	$10^6$	М
Милли...	$10^{-3}$	м	Гига...	$10^9$	Г
Санتي...	$10^{-2}$	с	Тера...	$10^{12}$	Т

Таблица 2.

Названия чисел от миллиарда и выше в разных странах

	Россия, США, Франция	Германия, Англия
$10^9$	миллиард (биллион)	миллиард
$10^{12}$	триллион	биллион
$10^{15}$	квадриллион	биллиард
$10^{18}$	квинтиллион	триллион
$10^{21}$	секстиллион	триллиард
$10^{24}$	септиллион	квадриллион

Таблица 3.

Правила действий со степенями и корнями

$a^x \cdot a^y = a^{x+y}$	$(a^x)^y = a^{xy}$
$a^x \cdot b^x = (a \cdot b)^x$	
$1 / a^x = a^{-x}$	

Таблица 4.

Значение поправочного коэффициента на радиоактивный распад  $K = e^{0,693 \cdot t/T}$

для различных значений времени  $t$ , выраженного в долях полураспада  $T$  [12].

$t/T$	K	$t/T$	K	$t/T$	K	$t/T$	K
0,00	1,00	0,40	1,32	0,80	1,73	1,20	2,29
0,01	1,007	0,41	1,133	0,81	1,74	1,21	2,31
0,02	1,01	0,42	1,34	0,82	1,75	1,22	2,32
0,03	1,02	0,43	1,34	0,83	1,77	1,23	2,33
0,04	1,03	0,44	1,35	0,84	1,79	1,24	2,34
0,05	1,03	0,45	1,36	0,85	1,80	1,25	2,36
0,06	1,04	0,46	1,37	0,86	1,81	1,26	2,38
0,07	1,05	0,47	1,38	0,87	1,82	1,27	2,40
0,08	1,06	0,48	1,39	0,88	1,84	1,28	2,42
0,09	1,06	0,49	1,40	0,89	1,85	1,29	2,44
0,10	1,07	0,50	1,41	0,90	1,86	1,30	2,46
0,11	1,08	0,51	1,42	0,91	1,88	1,31	2,47
0,12	1,09	0,52	1,43	0,92	1,89	1,32	2,49
0,13	1,10	0,53	1,44	0,93	1,90	1,33	2,51
0,14	1,11	0,54	1,45	0,94	1,92	1,34	2,53
0,15	1,11	0,55	1,46	0,95	1,93	1,35	2,54
0,16	1,12	0,56	1,47	0,96	1,94	1,36	2,56
0,17	1,13	0,57	1,49	0,97	1,95	1,37	2,58
0,18	1,14	0,58	1,50	0,98	1,97	1,38	2,59
0,19	1,14	0,59	1,51	0,99	1,99	1,39	2,61
0,20	1,15	0,60	1,52	1,00	2,00	1,40	2,63
0,21	1,16	0,61	1,53	1,01	2,01	1,41	2,64
0,22	1,16	0,62	1,54	1,02	2,02	1,42	2,66
0,23	1,17	0,63	1,55	1,03	2,03	1,43	2,68
0,24	1,18	0,64	1,56	1,04	2,04	1,44	2,70
0,25	1,19	0,65	1,57	1,05	2,05	1,45	2,72
0,26	1,19	0,66	1,58	1,06	2,07	1,46	2,75

t/T'	K	t/T	K	t/T	K	t/T	K
0,27	1,20	0,67	1,59	1,07	2,09	1,47	2,77
0,28	1,21	0,68	1,60	1,08	2,10	1,48	2,78
0,29	1,22	0,69	1,61	1,09	2,11	1,49	2,80
0,30	1,23	0,70	1,62	1,10	2,13	1,50	2,82
0,31	1,24	0,71	1,63	1,11	2,14	1,51	2,84
0,32	1,25	0,72	1,64	1,12	2,15	1,52	2,86
0,33	1,25	0,73	1,65	1,13	2,17	1,53	2,88
0,34	1,26	0,74	1,67	1,14	2,19	1,54	2,90
0,35	1,27	0,75	1,68	1,15	2,20	1,55	2,92
0,36	1,28	0,76	1,69	1,16	2,22	1,56	2,94
0,37	1,29	0,77	1,70	1,17	2,24	1,57	2,96
0,38	1,30	0,78	1,71	1,18	2,25	1,58	2,98
0,39	1,31	0,79	1,72	1,19	2,27	1,59	3,00
1,60	3,02	1,95	3,85	3,50	11,36	5,00	32,00
1,61	3,04	1,96	3,88	3,55	11,74	5,05	33,12
1,62	3,06	1,97	3,91	3,60	12,06	5,10	34,12
1,63	3,09	1,98	3,94	3,65	12,55	5,15	35,52
1,64	3,11	1,99	3,97	3,70	12,94	5,20	36,60
1,65	3,13	2,00	4,00	3,75	13,40	5,25	38,09
1,66	3,15	2,05	4,16	3,80	13,87	5,30	39,2,5
1,67	3,17	2,10	4,31	3,85	14,39	5,35	40,45
1,68	3,19	2,15	4,44	3,90	14,88	5,40	42,10
1,69	3,22	2,20	4,57	3,94	15,49	5,45	43,38
1,70	3,25	2,25	4,73	4,00	16,00	5,50	45,15
1,71	3,27	2,30	4,90	4,05	16,45	5,55	46,53
1,72	3,29	2,35	5,10	4,10	17,12	5,60	48,42
1,73	3,31	2,40	5,26	4,15	17,81	5,65	49,90
1,74	3,33	2,45	5,47	4,20	18,17	5,70	51,94
1,75	3,35	2,50	5,64	4,25	18,92	5,75	53,52
1,76	3,38	2,55	5,81	4,30	19,69	5,80	55,70
1,77	3,40	2,60	6,05	4,35	20,40	5,85	57,40
1,78	3,42	2,65	6,27	4,40	21,12	5,90	59,74

t/T'	K	t/T	K	t/T	K	t/T	K
1,79	3,45	2,70	6,49	4,45	21,76	5,95	62,18
1,80	3,47	2,75	6,73	4,50	22,65	6,00	64,00
1,81	3,49	2,80	6,96	4,55	23,34	7,00	128,00
1,82	3,52	2,85	7,17	4,60	24,29	8,00	256,00
1,83	3,54	2,90	7,46	4,65	25,03	9,00	512,00
1,84	3,56	2,95	7,76	4,70	26,05	10,00	1024,00
1,85	3,59	3,00	8,00	4,75	26,84		
1,86	3,62	3,05	8,25	4,80	27,94		
1,87	3,64	3,10	8,58	4,85	28,79		
1,88	3,67	3,15	8,93	4,90	39,96		
1,89	3,70	3,20	9,21	4,95	30,88		
1,90	3,72	3,25	9,52				
1,91	3,75	3,30	9,87				
1,92	3,78	3,35	10,18				
1,93	3,80	3,40	10,54				
1,94	3,82	3,45	10,91				

Таблица 5.

## Плотность некоторых веществ [12].

Вещество	Плотность (г/см <sup>3</sup> )	Вещество	Плотность (г/см <sup>3</sup> )
Алюминий ..	2,70	Латунь.....	8,4 - 8,7
Бетон .....	2,10 - 2,4	Медь .....	8,9
Вода .....	1,00	Молибден	10,0
Воздух .....	0,001293	Никель .....	8,9
Вольфрам ..	19,3	Олово .....	7,29
Дюралюминий	2,79	Платина ...	21,5
Железо .....	7,87	Плексиглас	1,16 - 1,20
Сталь .....	7,10 - 10,5	Резина .....	0,91 - 0,93
Золото .....	19,32	Свинец .....	11,34
Иридий .....	22,41	Слюда.....	2,7 - 3,2
Кадмий .....	8,64	Уран .....	18,7
Кобальт .....	8,6	Чугун .....	7,2

Таблица 6.

Толщина слоя половинного ослабления  $\Delta 1/2$  бета-излучения  
в алюминии [12].

$E_{\beta}$ (МэВ)	мг/см <sup>2</sup>	$E_{\beta}$ (МэВ)	мг/см <sup>2</sup>	$E_{\beta}$ (МэВ)	мг/см <sup>2</sup>	$E_{\beta}$ (МэВ)	мг/см <sup>2</sup>
0,01	0,1	0,17	3,0	0,9	45	2,5	173
0,02	0,3	0,18	3,3	1,0	53	2,6	180
0,03	0,5	0,19	3,6	1,1	62	2,7	190
0,04	0,7	0,20	3,9	1,2	70	2,8	195
0,05	0,8	0,22	4,5	1,3	78	2,9	200
0,06	1,0	0,24	5,0	1,4	87	3,0	210
0,07	1,3	0,26	5,6	1,5	97	3,1	218
0,08	1,5	0,28	6,3	1,6	107	3,2	223
0,09	1,6	0,30	7,0	1,7	117	3,3	230
0,10	1,8	0,35	9,0	1,8	121	3,4	238
0,11	2,0	0,40	11,7	1,9	130	3,5	244
0,12	2,2	0,45	14,6	2,0	140	3,6	250
0,13	2,3	0,5	17,5	2,1	147	3,7	260
0,14	2,5	0,6	24	2,2	150	3,8	265
0,15	2,6	0,7	30	2,3	159	3,9	270
0,16	2,8	0,8	37	2,4	168	4,0	280

Примечание. В таблице даны величины слоя половинного ослабления в мг/см<sup>2</sup> алюминия, но эта величина правильна практически для всех встречающихся в обычной работе веществ. Для того чтобы определить слой половинного ослабления в линейных единицах, надо приведенные в таблице значения разделить на плотность данного вещества, выраженную в мг/см<sup>3</sup>.

Таблица 7.

Пробег  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц различной энергии в мышечной ткани [8].

Энергия частиц, МэВ	Пробег, мкм	
	$\alpha$	$\beta$
0.1	-	110
0.3	-	700
0,5	-	1400
0,6	-	1700
1.0	3,0	3500
1,2	4,0	4300
2,0	10	8000
2,3	12	9600
3.0	15	12500
3,5	20	14500
5,0	50	-



Таблица 8

## Основные радиационные величины и их единицы

Физическая величина	Единица, ее наименование, обозначение (международное, русское)		Соотношение между единицами	
	Внесистемная	СИ	Внесистемной и СИ	СИ и внесистемной
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри (Ci, Ки)	беккерель (Bq, Бк)	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$	$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$
Экспозиционная доза излучения	рентген (R, Р)	кулон на килограмм (C/Kg, Кл/кг)	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$
Мощность экспозиционной дозы излучения	рентген в секунду (R/s Р/с)	ампер на килограмм (A/Kg, А/кг)	$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$	$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}$
Поглощенная доза излучения	рад (rad, рад)	грэй (Gy, Гр)	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$	$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
Мощность поглощенной дозы излучения	рад в секунду (rad/s, рад/с)	грэй в секунду (Gy/s, Гр/с)	$1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Гр/с}$	$1 \text{ Гр/с} = 100 \text{ рад/с}$
Интегральная доза излучения	рад-грамм (rad-g, рад-г)	джоуль (J, Дж)*	$\text{рад} \cdot \text{г} = 10^{-5} \text{ Дж}$	$1 \text{ Дж} = 10^5 \text{ рад} \cdot \text{г}$
Эквивалентная доза излучения**	бэр (rem, бэр)	зиверт (Sv/s, Зв)	$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$
Мощность эквивалентной дозы излучения	бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)	$1 \text{ бэр/с} = 0,01 \text{ Зв/с}$	$1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ бэр/с}$

\* Поскольку 1 Гр по определению есть 1 Дж на 1 кг, единица СИ интегральной дозы Грей·килограмм преобразуется в джоуль ( $1 \text{ Гр} \cdot \text{кг} = 1 \text{ (Дж/кг)} \cdot \text{кг} = 1 \text{ Дж}$ ).

\*\* Термин "эквивалентная доза излучения" и ее единица Зиверт допускаются к применению только в области радиационной безопасности.

## Литература (10 – для таблиц - Воккен)

1. Аклеев А. В. Основные заключения по радиобиологическим эффектам для целей радиационной защиты. Радиационная биология. Радиозкология, 2011, том 51, № 5, с. 501-511.
2. Анненков Б.Н., Юдинцева Е.В. Основы сельскохозяйственной радиологии.- М.: Агропромиздат, 1991.- 287 с.
3. Амусья М.Л. Атомный фотоэффект.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 272 с.
4. Белановский А.С. Радиоактивные излучения и их применения в ветеринарии. Учебное пособие.- М.: МВА, - 1980.- 67 с.
5. Белов А.Д, Косенко А.С., Пак В.В. и др. Практикум по ветеринарной радиобиологии /Под ред. А.Д.Белова.- М.: Агропромиздат, 1988.- 240 с.
6. Белов А.Д, Киршин В.А. Ветеринарная радиобиология. М.: Агропромиздат, 1987.- 287 с.
7. Берикбосинов В.Т., Гущин Ю.Г., Евсеев В.И. и др. Что такое быстрый ядерный реактор? /Под общей ред. акад. Ф.М.Митенкова.- М.: ИздАТ, 1992.- 48 с.
8. Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 160 с.
9. Бурлакова Е.Б., Найдич В.И. К 25-летию с момента аварии на Чернобыльской АЭС. Радиационная биология. Радиозкология, 2011, том 51, № 4, с. 389-398.
10. Вайнберг М.Ш. Доза излучения. // Медицинская радиология, 1991.- т. 36.- № 10.- С.53-55.
11. Власов П.В. Беседы о рентгеновских лучах.- М.: Изд-во Молодая гвардия, 1977.- 222 с.

12. Воккен Г.Г. // Ветеринарная радиология, Москва - Ленинград: Колос, 1964.- 272 с.
13. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд./ Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. и др.; Под ред. Филова В.А. и др.- Л.: Химия, 1990.- 464 с.
14. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах.- М.: Энерго-атомиздат, 1990.- 536 с.
15. Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека. - М.: Энергоатомиздат, 1988. -184 с.
16. Голутвина М.М., Абрамов Ю.В. Контроль за поступлением радиоактивных веществ в организм человека и их содержанием /Под ред. Л.А.Булдакова. -М.: Энергоатомиздат, 1989.- 176 с.
17. Грибов Л.А., Прокофьева Н.И. Основы физики.- М.: Высш. шк., 1992.- 430с.
18. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений.- Киев: Наук. думка, 1989.- 384 с.
19. Губарев В.С. Зарево над Припятью.- М.: Изд-во Молодая гвардия, 1987.- 240 с.
20. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии.- Киев: Изд-во УСХА, 1991.- 328 с.
21. Девис П. Суперсила: Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. Е.М. Лейкина.- М.: Мир, 1989.- 272 с.
22. Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология.- Атомиздат, 1973.- 248 с.
23. Дозовые зависимости нестохастических эффектов, основные концепции и величины используемые в МКРЗ:

- Публикации 41, 42 МКРЗ: Цер.с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.- 88с.
24. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 336 с.
  25. Защита от ионизирующих излучений: т. 2. Защита от излучений ядерно-технических установок: Учеб. для вузов / Н.Г.Гусев, Е.Е.Ковалев, В.П.Машкович, А.П.Суворов; Под ред. Н.Г.Гусева.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 352 с.
  26. Иванов В.И. Курс дозиметрии: Учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 400 с.
  27. Иванов В.И., Лысцов В.Н., Губин А.Т. Справочное руководство по микродозиметрии /Под общ. ред. В.И.Иванова. М.: Энергоатомиздат, 1986.- 184 с.
  28. Как организовать общественный экологический мониторинг: Руководство для общественных организаций. // Е.А.Васильева и др. / Под ред. М.В.Хотулевой.- М.:Социально-Экологический Союз, 1997.- 256 с.
  29. Карпов И.И., Лисневский Ю.И. Кварки.- М.: Наука, 1976.- 110 с.
  30. Киршин В.А., Бударков В.А. Ветеринарная противорадиационная защита.- М.: Агропромиздат, 1990.- 207 с.
  31. Коггл Дж. Биологические эффекты радиации.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 184 с.
  32. Комминс Ю., Буксбаум Ф. Слабые взаимодействия лептонов и кварков: Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 440 с.
  33. Кузин А.М. Радиационная биохимия.- М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962.- 333 с.
  34. Лещинский Н.И. Опасно ли применение радиоактивных веществ?- М.: Атомиздат, 1968.- 69 с.

35. Линденбратен Л.Д. Медицинская радиология.- М.: Медицина, 1969.- 399 с.
36. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение; Учеб. пособие.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 304 с.
37. Нормы радиационной безопасности НРБ—76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП—72/87/Минздрав СССР.- М.: Энергоатомиздат, 1988.- 160 с.
38. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96).- М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.- 126 с.
39. Ограничение облучения ионизирующей радиацией // Доклад НКРЗ, 1993.- № 116.- 88 с.
40. Пономарев Л.И. Под знаком кванта.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 368 с.
41. Потупа А.С. Бег за бесконечностью.- М.: Изд-во Молодая гвардия, 1977.- 223 с.
42. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ.-М.: Мир, 1990.- 79 с.
43. Рачинский В.В. Курс основ атомной техники в сельском хозяйстве.- М.: Атомиздат, 1978.- 381 с.
44. Рачинский В.В. Краткие рекомендации по радиологической терминологии. //Медицинская радиология и радиационная безопасность, 1998.- т. 43.- № 5.- С. 75 - 77.
45. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 320 с.

46. Сивинцев Ю.В. Радиация и человек.- М.: Изд-во Знание, 1987.- 63 с.
47. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика: Учеб. пособие для вузов. В 2-х ч. Ч. 2. Ядерная физика.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989.- 416 с.
48. Федеральный Закон "О радиационной безопасности населения" от 9 января 1996 г. - Российская газета, № 9, 17.01.96; Собрание законодательства РФ, № 3, 15.01.96.
49. Франк-Каменецкий М.Д. Самая главная молекула. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983.-160 с. (Библиотечка «Квант», Вып. 25).
50. Штреффер К. Радиационная биохимия.- М.: Атомиздат, 1972.- 195 с.
51. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных.- М.: Высш. шк., 1988.- 424 с.

## Содержание.

- Глава 1. Общие положения о строении атома и атомного ядра.
1. 1 Взаимосвязь массы и энергии.
  - 1.2 Строение вещества.
  - 1.3 Характеристика электрона и некоторых его свойств.
  1. 4 Строение ядра, характеристика ядерных сил, энергия связи нуклонов.
    - 1.4.1 Строение ядра.
    - 1.4.2 Характеристика ядерных сил.
    - 1.4.3 Энергия связи ядра.
- Глава 2. Радиоактивность.
- 2.1 Явление радиоактивности.
  - 2.2 Естественные и искусственные радиоактивные вещества.
  - 2.3 Единицы радиоактивности.
  - 2.4 Закон радиоактивного распада.
  - 2.5 Типы ядерных распадов.
    - 2.5.1 Альфа-распад.
    - 2.5.2 Бета-распад.
    - 2.5.3 Гамма-излучение ядер и внутренняя конверсия электронов.
    - 2.5.4 Спонтанное деление тяжелых ядер.
    - 2.5.5 Протонная радиоактивность.
    - 2.5.6 Графические схемы радиоактивного распада
  - 2.6 Ядерные реакции.
    - 2.6.1 Основные механизмы ядерных реакций.
    - 2.6.2 Вынужденное деление ядер и цепные ядерные реакции деления в ядерных бомбах и реакторах.
    - 2.6.3 Термоядерные реакции.
- Глава 3. Воздействие ионизирующих излучений на среду.
- 3.1 Особенности действия альфа-излучений на среду.
  - 3.2 Особенности действия бета-излучения на среду.

3.3 Особенности действия электромагнитных излучений на среду.

3.4 Особенности действия нейтронного излучения на среду.

Глава 4. Основные дозовые характеристики ядерных излучений.

4.1 Экспозиционная и поглощенная дозы излучения.

4.2 Эквивалентная доза.

4.3 Эффективная эквивалентная доза

4.4 Мощность дозы.

4.5 Соотношение между дозой, создаваемой гамма-излучением радиоактивных препаратов и их активностью

4.6 Принцип расчета доз при внутреннем (инкорпорированном) облучении.

4.7 Полувековая ожидаемая эквивалентная доза

4.8 Полувековая ожидаемая эффективная эквивалентная доза

4.9 Дозовые величины, относящиеся к популяции.

4.9.1 Коллективная эквивалентная доза

4.9.2 Коллективная эффективная эквивалентная доза

4.9.3 Эквивалентная доза на душу населения

4.10 Основные положения норм радиационной безопасности.

Приложения