Томский музыкальный колледж

О.М. Шепель

ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОЙ НАУКИ

Учебное пособие

Москва
2018

УДК 373.167.1653+54
ББК 22.3я72+24.1я72
Ш48

Рецензенты:

Осокина Светлана Евгеньевна – зав. кафедрой общеобразовательных дисциплин, преподаватель высшей квалификационной категории Томского музыкального колледжа;

Колесникова Светлана Ивановна – доктор технических наук, профессор кафедры математики и математического моделирования Научного исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ).

Шепель О.М.

Ш48 Естествознание постнеклассической науки: учебное пособие. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2018. – 224 с.

ISBN 978-5-91327-545-5

DOI 10.17513/пр.327

В пособии изложены разделы физики, химии, биологии, предусмотренные образовательными стандартами Российских вузов, колледжей, общеобразовательных средних школ.

Адресовано преподавателям и студентам высших учебных заведений, а также учителям и учащимся средних, средних специальных учебных заведений.

УДК 373.167.1653+54
ББК 22.3я72+24.1я72

ISBN 978-5-91327-545-5

© Шепель О.М., 2018
© ИД «Академия Естествознания»
© АНО «Академия Естествознания»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Уважаемый читатель! Предлагаемые Вашему вниманию материалы составлены на основе представлений о неразрывной целостности естественнонаучной картины мира и условности разделения всех знаний на различные отрасли науки. Книгу рекомендуется использовать при изучении естествознания, а также на уроках, физики, химии, биологии.

В тексте уделено очень немного внимания практическому применению тех или иных естественнонаучных законов или химических веществ. Это вызвано тем, что, по мнению автора, содержание настоящей книги должно представлять собой не набор утилитарных сведений, предназначенных для практического использования в материальной жизни, но быть отражением фрагмента единой, величественной естественнонаучной картины мира, восприятие которой помогает взрослеющему человеку осмыслить своё место во Вселенной. Именно поэтому технологические аспекты естественных дисциплин, здесь почти не рассматриваются.

ВВЕДЕНИЕ

Постичь гармонию вселенной,
Молекул, атомов, и числ,
Познать чрез них То, что нетленно...
Быть может в этом жизни смысл?

О.М. Шепель

Для того чтобы разобраться в вопросе «Что такое естествознание?» необходимо вспомнить ответ на вопрос «Что такое наука?»

Известно, что наука – это деятельность, направленная на изучение чего-либо, а также результат этой деятельности. Выделившись когда то из всеобщего единого процесса познания, включавшего в себя искусство и даже религию, наука стала делиться на всё более и более узкие области – дифференцироваться. В настоящее время все науки принято подразделять на гуманитарные, естественные и математические. В свою очередь среди естественных наук иногда выделяют точные и описательные (рис. 01)

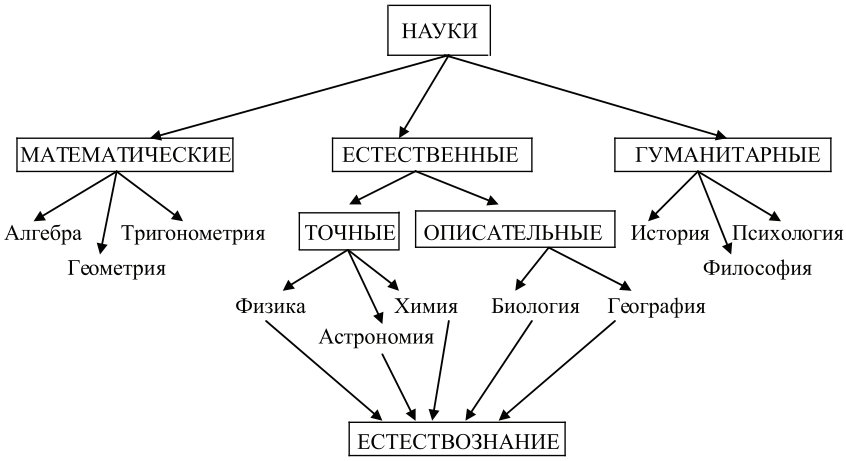


Рис. 01. Классификация естественно-математических дисциплин

При этом подразумевается, что гуманитарная наука – это деятельность, направленная на изучение:

– способов, особенностей, динамики социальной коммуникации (человеческого общения);

– соотношения человека и окружающей действительности, а также результат этой деятельности.

Естественная наука – это деятельность, направленная на изучение *закономерностей* протекания природных процессов и, в зависимости от конкретного объекта изучения, воспринимаемая как: физика, химия, астрономия, биология или география.

Как видно из приведённых определений, главной отличительной особенностью естественных наук, отделяющей их от наук гуманитарных, является поиск *природных закономерностей*.

Хотя некоторые научные направления классифицируют ещё как технические науки, однако, в сущности, каждое из них представляет собой причудливую смесь различных естественных наук.

Математическая наука – это деятельность, направленная на изучение закономерностей превращения одних чисел в другие.

Точные науки стремятся к **математическому** описанию изучаемых явлений. *Описательные науки* ограничиваются феноменологическими формулировками изучаемых закономерностей. Следует сразу же подчеркнуть условность такого деления – отсутствие чёткой границы, разделяющей науки описательные от точных. Например, вся современная химия основывается на периодическом законе Д.И. Менделеева, который, пока, никому не удалось представить каким – либо строгим уравнением. Тем не менее, стремление исследователей к математическому описанию любого химического процесса, позволяет относить эту дисциплину к точным наукам. Вместе с тем, традиционно считающаяся описательной биология также всё чаще прибегает к математическим формулировкам, обнаруживаемых ею закономерностей, особенно генетических. Но если такую условность деления, всё-таки, принять, то можно утверждать, что:

физика – это естественная точная наука, изучающая закономерности превращения одних видов энергии в другие;

химия – это естественная точная наука, изучающая закономерности превращения одних веществ в другие, не сопровождающиеся изменением состава ядра атомов;

биология – это естественная описательная наука, изучающая закономерности существования живых тел.

Однако, в настоящее время процесс дифференциации естественных наук всё отчётливей приобретает черты своей противоположности –

черты интеграции, то есть процесса слияния различных наук в одно единое неразрывное целое.

Например, при объяснении химических превращений протеканием физических процессов оказалось невозможно однозначно решить какое из явлений в этом случае обсуждается – физическое или химическое. Поэтому родилась физическая химия. Но этого оказалось мало, в 30-х годах прошлого столетия ряд физических процессов стали воспринимать как следствие химических превращений. Появилась химическая физика. Кроме того, когда окончательно убедились, что живые тела не могут существовать, не превращая одни вещества в другие, то и разделение биологии с химией было признано также весьма умозрительным – появились биохимия и молекулярная биология, объекты изучения которых интересны как для биологов, так и для химиков. Изучение закономерностей функционирования живых систем оказалось невозможным без тщательного исследования физических процессов, протекающих в организмах, вследствие чего стала развиваться биофизика. Развитие астрономии на определённом этапе тоже оказалось немыслимым без физики – возникла астрофизика. Геохимия сформировалась вследствие неразрывности химии и географии, ведь закономерности формирования земной оболочки во многом определяются её химическим составом.

Таким образом, оказалось, что объективная естественнонаучная картина мира представляет собой одно единое целое, условное разделение которого на объекты исследования различными науками является лишь удобным инструментом познания мира. И это единое целое должно изучаться отдельной самостоятельной наукой, которую называют ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ.

ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ – это точная наука, рассматривающая физику, астрономию, химию, биологию, географию, как аспекты единого неразрывного целого.

Историю развития естествознания условно можно разделить на четыре последовательных этапа, каждый последующий из которых знаменует формирование более высокого уровня науки по сравнению с этапом предыдущим (рис. 02).

Первый этап – синкретическая наука, которая представляла собой становление научного познания, ещё не дифференцированного, не расчленённого на отдельные отрасли. Наука только зарождалась, пыталась заменить мифологию, старалась постигать окружающий мир, заменяя слепую веру знанием. Знаковыми представителями этого этапа можно назвать Пифагора (6 в. до н.э) и Аристотеля (384–322 до н.э.). Будучи разделёнными во времени друг от друга почти на три столетия, они одинаково целостно воспринимали науку, искусство и религию.

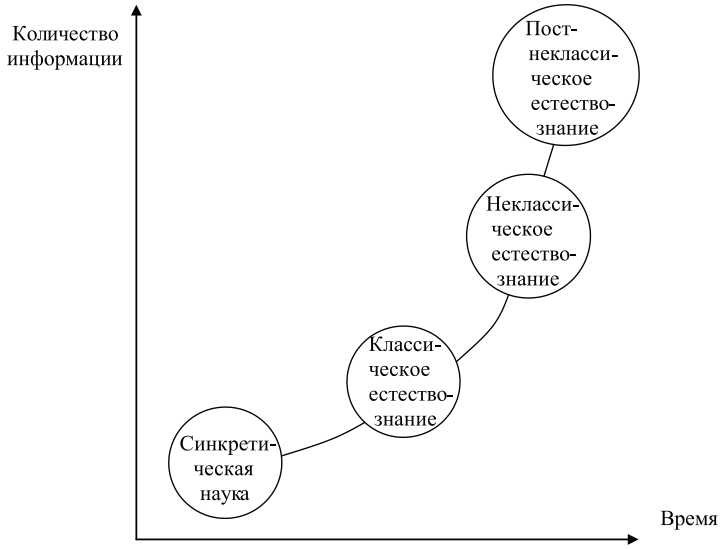


Рис. 02. Экспоненциальный рост количества информации, вырабатываемой научными исследованиями

Второй этап – классическое естествознание, основанное на законах, открытых И. Ньютоном, Л. Больцманом, Д. Меделеевым и другими. Характеризуется выделением науки в самостоятельную отрасль знания и её дальнейшей дифференциацией на отдельные, независимые направления. В частности, естествознание формируется как совокупность физики, химии, астрономии, биологии и географии.

Третий этап – неклассическое естествознание, сформированное физикой

А. Эйнштейна, В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера Кардинально изменились представления о пространстве, времени, строении вещества. Пространство и время стали восприниматься аспектами единого пространственно-временного континуума, а вещество, состоящим из элементарных частиц, характеризуемых: корпускулярно–волновым дуализмом, вероятностным характером движения и принципом неопределённости Гейзенберга, согласно которому невозможно определить одновременно абсолютно точно координаты расположения и импульс элементарной частицы. Наметились тенденции к интеграции различных естественных наук.

Четвёртый этап – постнеклассическое естествознание, основанное отцами синергетики: И. Пригожиным, Г. Николисом, Г. Хакеном. Ознаменовался открытием макропроцессов, не подчиняющихся жёстко

детерминированным естественнонаучным законам и протекающих в самоорганизующихся системах. Направления развития многих природных процессов оказались непредсказуемыми в принципе. Интеграция различных естественных наук переросла в интеграцию всего естествознания с гуманитарными и математическими науками.

В настоящем учебном пособии будут подробно рассмотрены достижения классического, неклассического и постнеклассического естествознания. При этом географические аспекты этой науки рассматриваться не будут. Хотя исследования оболочки нашей планеты, безусловно, является частью единого процесса познания действительности, однако, они не повлияли на формирование новых уровней естествознания. Что касается астрономии, то её законы будут здесь рассматриваться как частные случаи законов физических.

Таким образом, уважаемый читатель, Вам предстоит изучение классического, неклассического и постнеклассического естествознания, развивающегося в рамках физики, химии и биологии.

---

1. Что такое наука?

2. Чем отличаются естественные науки от гуманитарных?

3. Дайте определения следующим понятиям: физика, химия, астрономия, биология, география.

4. Что такое естествознание?

Глава 1. ФИЗИКА

1.1. Классическая физика

§ 1.1.1. Основные понятия классической физики

Одними из основополагающих понятий классической физики являются:
– пространство;
– время;
– событие;
– наблюдатель;
– тело;
– физическое взаимодействие;
– энергия;
– сила;
– работа;
– энтропийная энергия;
– энтропия;
– физическое поле.

Пространство в классической физике представляется как бесконечная протяженность, в которой всегда можно выделить три взаимно перпендикулярных направления (измерения) – длину, ширину, высоту. В истории естествознания сохранилось под названием «трёхмерное евклидовое пространство».

Время – длительность, бесконечно движущаяся только в одном направлении, от прошлого к будущему.

Событие – явление или процесс, наблюдающиеся в пространстве и протекающие во времени.

Наблюдатель – субъект, воспринимающий события.

Пространство, время, событи и наблюдатель рассматриваются как четыре независимых друг от друга компонента действительности. Всякое событие жёстко детерминировано, то есть, воспринимается как неизбежное следствие причины, вызвавшей это событие.

Тело – это объект, состоящий из вещества, то есть, обладающий массой покоя и представляющий собой форму существования вещества.

Физическое взаимодействие – взаимное воздействие тел друг на друга. На сегодняшний день принято выделять 5 типов фундаментальных физических взаимодействий:

- гравитационное – между гравитационными массами тел;
- электромагнитное – между зарядами тел;

- сильное – между нуклонами атомов (протонами и нейтронами). Обеспечивает объединение нуклонов в ядро (радиус действия ≈ 10^{-15} м);
- слабое – обеспечивающее распад ядер атомов и элементарных частиц[1] (радиус действия ≈ $2 \cdot 10^{-18}$ м). Слабее сильного и электромагнитного, но намного сильнее гравитационного.
- поле Хиггса – *это взаимодействие между частицей, имеющей массу, и частицей, называемой «Бозон Хиггса», которая была предсказан в 1964 и открыта в 2012 году.*

Указанные взаимодействия называют ***фундаментальными*** потому что абсолютно любые взаимодействия в природе сводятся к этим пяти. При этом, следует иметь в виду, что в конце 60-х годов 20 века было доказано, что электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой два аспекта единого взаимодействия, которое назвали электрослабым. Схематично такая классификация фундаментальных физических взаимодействий представлена на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Традиционная классификация фундаментальных взаимодействий

Энергия – Скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения материи и перехода движения материи из одних форм в другие.

Сила – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на данное тело других тел.

Работа – количественная характеристика *действия* силы и перемещения точки ее приложения.

Энтропийная энергия – энергия, неспособная превратиться в работу (обесцененная). Например, если газ внутри воздушного шара под воздействием солнечных лучей расширится, сохранив первоначальную температуру, то энергия этого газа останется неизменной. Однако, способность газа совершать работу по расширению уменьшится, потому что

[1] Например, свободный нейтрон может распадаться на протон, электрон и электронное антинейтрино. Протон, находящийся в составе ядра, может распадаться на нейтрон, позитрон и электронное антинейтрино.

часть этой работы окажется совершённой. При этом говорят, что возросла энтропийная энергия газа.

Энтропия (S) – мера обесцененной энергии (Q), связанная с нею уравнением:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

для изотермических процессов, где T – абсолютная температура. Иначе энтропию толкуют как меру беспорядка из-за увеличения возможности свободного движения каждого атома газа при увеличении объёма.

Физическое поле – это *свойство пространства или среды* направленно воздействовать на то или иное физическое тело.

Подобно тому, как любое тело может приобретать различные свойства при неодинаковых условиях, пространство также способно проявлять разнообразные свойства. Например, вода может быть жидкой, твёрдой (лёд, снег), газообразной (пар). А пространство способно проявлять свойства физического поля: электрического, магнитного, гравитационного.

Источником поля называется тело, являющееся началом этого поля.

Гравитационное поле – свойство пространства направленно воздействовать на тело, обладающее массой. Источник гравитационного поля – масса другого тела (рис. 1.2).

Электрическое поле – это свойство пространства направленно воздействовать на покоящийся электрический заряд.

По сути, электрическое поле является аспектом электромагнитного поля, проявляющимся воздействием на *покоящееся* заряженное тело (электрический заряд).

Электрическое поле может возникать от источника – заряженного тела (рис. 1.3), а также существовать вне источника, образуя вихревые, то есть, замкнутые линии напряжённости в результате изменения магнитного поля (рис. 1.4), или являться компонентом

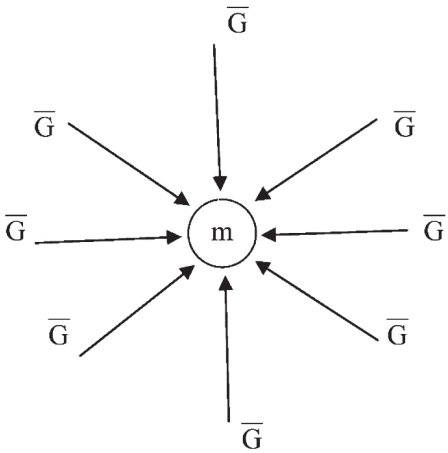


Рис. 1.2. Гравитационное поле, создаваемое массой m;
$\overline{G}$ – напряжённость гравитационного поля

невещественной волновой частицы – фотона, не обладающего массой покоя (рис. 1.5).

Электрическое поле, создаваемое покоящимся заряженным телом, называется электростатическим полем. Раздел физики, изучающий закономерности взаимодействия покоящихся зарядов называется электростатикой. Раздел физики, изучающий закономерности взаимодействия движущихся зарядов называется электродинамикой.

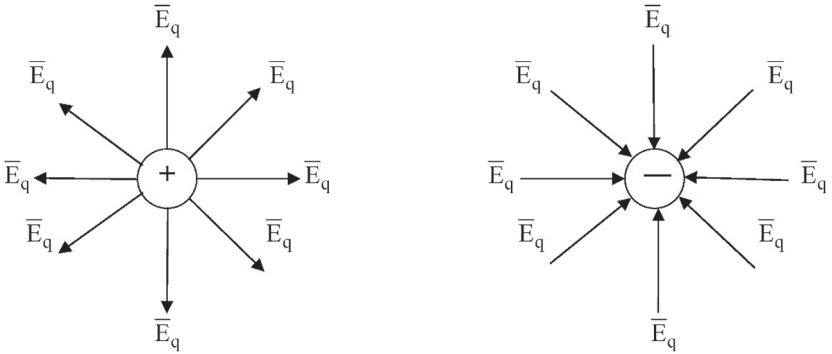


Рис. 1.3. Электрические поля, создаваемые покоящимися электрическими зарядами. $\overline{E}_q$ – напряжённость электрического поля, создаваемая покоящимся зарядом – векторная величина, указывающая направление и величину силы, действующей на положительный заряд

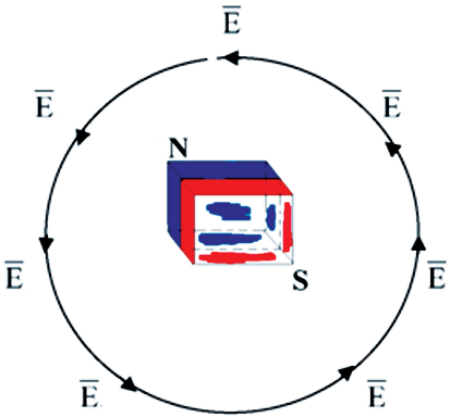


Рис. 1.4. Вихревое электрическое поле ($\overline{E}$), возникшее в результате движения магнита от читателя, перпендикулярно плоскости рисунка

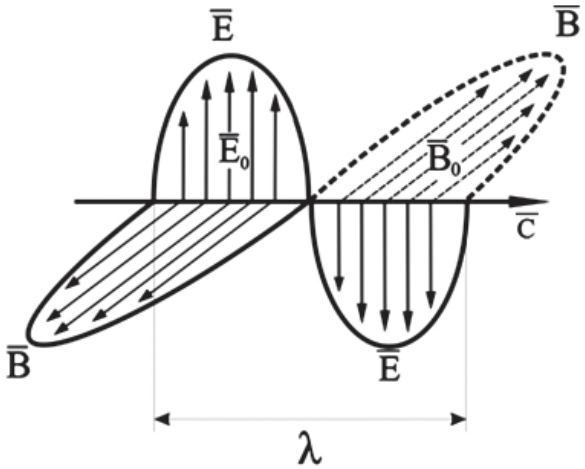


Рис. 1.5. Строение фотона. $\overline{\mathbf{B}}$ *– вектор магнитной индукции,* $\overline{\mathbf{E}}$ *– напряжённость электрического поля, λ – длина волны – расстояние между двумя ближайшими точками волны, находящимися в одной фазе движения*[2]*,* $\overline{\mathbf{E}}_0$ *и* $\overline{\mathbf{B}}_0$ *– амплитуды колебания*[3] *напряжённости электрического поля и вектора магнитной индукции соответственно,* $\overline{\mathbf{C}}$ *– вектор движения фотона со скоростью света. Хотя в состав фотона не входит вещество, однако, поскольку электрическое и магнитное поля обладают энергией (E), то на основании уравнения открытого Альбертом Эйнштейном* $E = mc^2$*, где c – скорость движения фотона в вакууме (c ≈ 300 000 км/с) считается, что фотон обладает релятивистской массой* $m = E/c^2$*. Но его масса покоя равна нулю*

При движении заряженной частицы в электрическом поле, она окажется под воздействием не только электрического, но и магнитного поля.

Магнитное поле – это свойство пространства направленно воздействовать на движущийся заряд. Магнитное поле не взаимодействует с покоящимся зарядом. Причиной возникновения магнитного поля является движение электрического заряда (рис. 1.6). Фотоны, включающие в себя магнитное поле, могут возникать в результате колебательного движения заряженной частицы, а также вследствие других форм взаимодействия веществ.

Магнитное поле не имеет источников, потому что оно либо является вихревым, а, значит не имеющим ни начала, ни конца, либо существует в составе фотона – частицы, не являющейся веществом (рис. 1.5).

[2] Под фазой движения в данном случае подразумевается значение производной dE_q/dl или dB/dl, где l – отрезок пересечения электрического и магнитного полей.

[3] Амплитуда колебания – это модуль наибольшего отклонения от среднего значения колеблющейся величины.

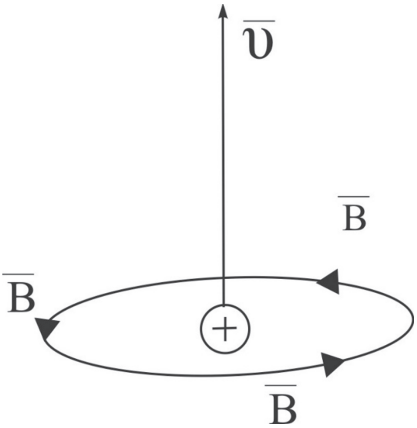


Рис. 1.6. Вихревое магнитное поле: $\overline{v}$ – вектор скорости движения положительно заряженной частицы; $\overline{\mathbf{B}}$ – вектор магнитной индукции

То есть, магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе нет. Неразрывность единства электрического и магнитного полей принято подчёркивать термином «электромагнитное поле». Электрическое и магнитное поля считаются аспектами одного электромагнитного поля.

Свойство пространства направленно воздействовать на электрический заряд, покоящийся или движущийся, называется *электромагнитным полем*.

Единство электромагнитного поля особенно наглядно проявляется в строении фотона.

Следует подчеркнуть, что фотон (рис. 1.5) не считается источником электрического или магнитного поля, поскольку не обладает массой покоя, а, значит, не является телом. Фотон рассматривается в качестве мельчайшей компоненты (кванта) электромагнитной волны (рис. 1.7)

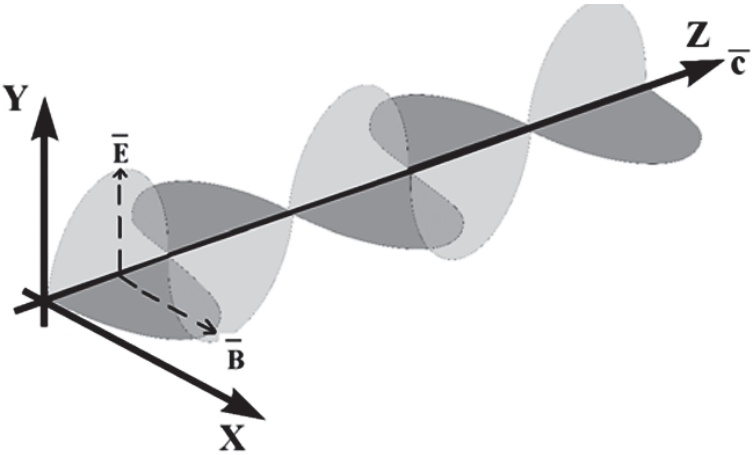


Рис. 1.7. Фрагмент электромагнитной волны, распространяющейся вдоль оси Z со скоростью света (c): колебания $\overline{\mathbf{B}}$ происходят вдоль оси X, колебания $\overline{\mathbf{E}}$ вдоль оси Y

Акустическое поле – это свойство колеблющейся среды (газообразной, жидкой или твёрдой) воздействовать на слух. При этом, под колебаниями подразумевают чередующиеся во времени сжатия и разряжения среды в виде *продольной* волны (рис. 1.8), вызванные каким либо источником.

Рис. 1.8. Иллюстрация продольного колебания среды, состоящей из отдельных частиц (молекул)

Энергия, с точки зрения классической физики, – это скалярная мера различных форм движения материи.

Сила – векторная мера механического воздействия на тело.

1. Дайте определения наиболее фундаментальным понятиям физики.

2. Какие существуют типы взаимодействия?

3. Объясните следующие понятия: электрическое поле, магнитное поле, гравитационное поле, акустическое поле.

§ 1.1.2. Гравитационное поле

Одной из основных количественных характеристик гравитационного поля, создаваемого массой M – источником гравитационного поля, служит его *напряжённость* – векторная величина $\overline{G}$ (рис. 1.2), равная отношению силы $\overline{F}$ гравитационного поля к массе m, испытывающей воздействие этой силы – пробной массе.

$\overline{G} = \overline{F}/m$ – векторная форма равенства;

$G = F/m$ – скалярная форма равенства.

То есть, напряжённость гравитационного поля можно воспринимать как силу этого поля, воздействующую на единицу пробной массы. В свою очередь, согласно второму закону Ньютона:

$$\overline{F} = m\overline{a},$$

или

$$F = ma,$$

где $\overline{a}$ и a – вектор ускорения и абсолютное значение ускорения пробной массы соответственно. Поэтому

$$\overline{G} = m\overline{a}/m = \overline{a},$$

или

$$G = ma/m = a.$$

Таким образом, под действием сил гравитационного поля свободная материальная точка приобретает ускорение, равное напряжённости этого поля.

Сила взаимодействия между массами подчиняется закону всемирного тяготения И. Ньютона:

Между всякими двумя материальными точками действуют силы взаимного притяжения, которые прямо пропорциональны массам точек (m_1, m_2) *и обратно пропорциональны квадрату расстояния* (r) *между ними:*

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где γ – гравитационная постоянная ($\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг²).

Значит, напряжённость гравитационного поля создаваемая массой m_1 может определяться равенством:

$$G_1 = \frac{F}{m_2} = \gamma \frac{m_1}{r^2}.$$

Если источником гравитационного поля является m_2, то m_1 – пробная масса:

$$G_2 = \frac{F}{m_1} = \gamma \frac{m_2}{r^2}$$

или в векторной форме:

$$\overline{F} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^3} \overline{r}\ ^{4};$$

$$\overline{G}_1 = -\gamma \frac{m_1}{r^3} \overline{r};$$

$$G_2 = -\gamma \frac{m_2}{r^3} \overline{r},$$

где $\overline{r}$ – радиус-вектор, направленный от массы, воспринимаемой как источник гравитационного поля к пробной массе.

[4] Знак «минус» означает, что сила направлена от пробной массы к источнику гравитационного поля, в то время как радиус-вектор $\overline{r}$ направлен в противоположную сторону.

Потенциальная энергия взаимодействия ($E_п$) масс m_1 и m_2 определяется равенством:

$$E_п = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r}.$$ [5]

Если напряжённость – отношение силы взаимодействия к пробной массе – является *силовой* количественной характеристикой источника гравитационного поля, то отношение потенциальной энергии взаимодействия $E_п$ к пробной массе m_2 является энергетической количественной характеристикой источника гравитационного поля m_1, и называется Ньютоновским гравитационным потенциалом (φ):

$$\varphi_1 = \frac{E_п}{m_2} = -\gamma \frac{m_1}{r}.$$

В случае, когда в качестве источника гравитационного поля рассматривают m_2, масса m_1 воспринимается как пробная:

$$\varphi_2 = \frac{E_п}{m_1} = -\gamma \frac{m_2}{r}.$$

Несмотря на то, что Земля своим гравитационным полем притягивает к себе Луну, ночное светило на Землю не падает. Это происходит потому, что Луна не покоится, а движется с постоянной скоростью вокруг Земли в направлении, перпендикулярном ускорению луны, направленном к Земле. В результате приближение Луны к Земле, вызванное ускорением $\overline{a}$, компенсируется удалением, обусловленным перпендикулярной скоростью $\overline{v}$, что и приводит к неизменности абсолютного значения расстояния между Землёй и Луной. Если приближённо считать, что луна движется вокруг Земли по строго круговой орбите, то:

$$\overline{a} = -\frac{v^2}{r^2}\overline{r}$$

или

$$a = \frac{v^2}{r}.$$

При этом, вектор $\overline{a}$ называется центростремительным ускорением, а противоположный вектор $\frac{v^2}{r^2}\overline{r}$ называют центробежным ускорением. Соответственно, для объекта, движущегося по окружности, произведение

[5] В данном случае «минус»означает, что при расходовании этой энергии, работа будет совершаться против радиус-вектора, направленного от источника гравитационного поля к пробной массе.

$m\overline{a}$ называется центростремительной силой, а вектор, определяемый равенством $m\frac{v^2}{r^2}\overline{r}$ – центробежной силой. Центростремительная сила гравитационного поля воздействует на пробную массу, а центробежная сила воздействует на связь между источником гравитационного поля и пробной массой. Скорость v тела, движущегося по окружности, нередко называют линейной скоростью, с тем, чтобы не путать её с угловой скоростью ($\overline{\omega}$), абсолютное значение которой определяется равенством

$$\omega = \frac{v}{r}.$$

Варианты представления размерности угловой скорости, рассчитанной по приведённой формуле, выглядят следующим образом:

$$[\omega] = \frac{\text{радиан}}{c} \equiv \frac{1}{c} = c^{-1}.$$

Скорость вращения, составляющая один оборот за секунду, в указанных единицах измерения равна $\frac{2\pi}{c}$. Направление угловой скорости можно определять по правилу буравчика. Поскольку, согласно закону Всемирного тяготения

$$F = \gamma\frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot a,$$

где a – ускорение пробной массы m, то:

$$\gamma\frac{M}{r^2} = a = \frac{v^2}{r}$$

или

$$v^2 = \gamma\frac{M}{r}.$$

Таким образом, мы получили зависимость скорости вращения космического объекта от массы центра этого вращения и расстояния до него.

Вам известно, что подобно тому, как Луна вращается вокруг Земли, Земля вращается вокруг Солнца. Но и само Солнце вращается вокруг центра нашей галактики, называемой Млечный Путь. При этом, если вращение Луны вокруг Земли или Земли вокруг Солнца подчиняется последнему уравнению, то вращение Солнца вокруг центра Млечного Пути этому уравнению не подчиняется. Скорость вращения Солнца оказывается существенно большей, чем должна быть при той массе, которая наблюдается в нашей галактике. Подобное явление было обнаружено и для других звёзд, и для других галактик. То есть, оказалось, что массу

галактик представляют не только звёзды, планеты, кометы и прочие наблюдаемые тела, но и материя, неизвестной природы никак не наблюдаемая. Она получила название «тёмная материя»

Тёмная материя – это неизвестное вещество, участвующее ***только*** *в гравитационном взаимодействии.*

Кроме того, выяснилось, что между массами, помимо сил притяжения, действуют и силы отталкивания, проявляющиеся на очень больших «космических» расстояниях. В настоящее время достоверно установлено, что Вселенная не просто расширяется, а расширяется с ускорением. То есть, расстояние между галактиками увеличивается во времени с возрастающей скоростью. Обнаруженное ускорение свидетельствует о воздействии на галактики какой-то силы, существовании Во Вселенной неизвестной ранее энергии, называемой «тёмная энергия».

Тёмная энергия – это энергия отталкивания между массами, проявляющаяся на больших «космических» расстояниях.

Примеры решения задачи

Задача

Оценить массу Земли, если известно, что её средний радиус 6371 км, а вблизи поверхности ускорение свободного падения составляет 9,8 м/с^2.

Дано:	*Решение*
$R = 6371$ км $\equiv 6371 \cdot 10^3$ м $a = 9{,}8$ м/с^2	$a = G = \gamma \dfrac{M}{R^2}$;
M – ?	$\boxed{M = aR^2/\gamma}$;

$$M = 9{,}8 \cdot 6371^2 \cdot 10^6 / 6{,}67 \cdot 10^{-11} \approx 6{,}0 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

Ответ: $M \approx 6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг.

Задачи для самостоятельного решения

1. Оцените абсолютное значение силы притяжения своего тела к земле, если ускорение свободного падения (g) равно 9,8 м/с^2.

2. Рассчитайте силу притяжения между Землёй и луной, а также между Землёй и солнцем, если среднее расстояние до луны составляет 384 467 км, а до солнца 149,6 миллиона километров. Масса луны $7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг, а масса солнца $2 \cdot 10^{30}$ кг. Оцените напряжённость гравитационного поля, создаваемого луной в точке расположения Земли и напряжённость гравитационного поля, создаваемого солнцем в этом же месте.

3. Оцените абсолютные значения:

– Ньютоновского гравитационного потенциала земли у её поверхности;

– потенциальной энергии взаимодействия Земли и своего тела.

4. Запишите в виде формулы зависимость φ от G.

5. Рассчитайте линейную скорость вращения планеты вокруг звезды, если радиус вращения составляет 10^{11} м, а центростремительное ускорение $2{,}25 \cdot 10^3$ м/с^2. Оцените абсолютное значение угловой скорости вращения этой планеты вокруг своей звезды. Выразите астрономический год этой планеты в единицах земных суток.

6. Оцените массу тёмной материи дисковидной галактики, диаметр которой составляет $9{,}5 \cdot 10^{20}$ м, а суммарная масса всех звёзд и планет $4{,}0 \cdot 10^{44}$ кг. Одна из звёзд этой галактики, расположенная от центра на расстоянии радиуса ($4{,}75 \cdot 10^{20}$ м), вращается вокруг этого центра со скоростью $1{,}7 \cdot 10^7$ м/с. С какой линейной скоростью вращалась бы эта звезда в отсутствие тёмной материи? Рассчитайте наблюдаемую работу, совершаемую силами тёмной энергии при дальнейшем удалении рассматриваемой галактики на расстояние в 1000 км от наблюдателя с ускорением $3{,}5 \cdot 10^{-24}$ м/с^2. Ускорение считать постоянным.

---

1. Какие величины являются количественными характеристиками гравитационного поля?

2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.

§ 1.1.3. Электрическое поле

Электрическое поле характеризуется величиной, которую принято называть «напряжённость электрического поля» ($\overline{E}_q$):

$$\overline{E}_q = \frac{\overline{F}}{q}, \qquad (1.1.)$$

где $\overline{F}$ – сила, воздействующая на пробный заряд q. Поскольку сила – величина векторная, то напряжённость – тоже векторная величина, являющаяся мерой силы, воздействующей на заряд (рис. 1.3). При использовании абсолютного значения силы (F) в уравнении (1.1.), частное будет представлять собой модуль напряжённости (E_q). Если источником электрического поля, воздействующего на заряд, является другой заряд, то F и $\overline{F}$ будут определяться основным законом электростатики (законом Кулона), который гласит, что ***сила отталкивания двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо***

пропорциональна произведению зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$ – скалярная форма записи закона Кулона;

$$\overline{F} = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^3}\overline{r}$$ – векторная форма записи закона Кулона,

где F – абсолютное значение силы отталкивания; k – коэффициент пропорциональности ($k = 9 \cdot 10^9$ Н·м^2/Кл^2); r – расстояние между зарядами; $\overline{r}$ – радиус-вектор, проведённый от источника электрического поля к точечному пробному электрическому заряду: $\overline{r} = |r|$.

Если заряд q_1 воспринимается как источник электрического поля, тогда заряд q_2 называется ***пробным*** зарядом, а напряжённость электрического поля (E_{q1} и $\overline{E}_{q1}$) определяется равенствами:

– скалярная форма записи напряжённости электрического поля

$$E_{q1} = \frac{F}{q_2} = k\frac{q_1}{r^2}; \qquad (1.2)$$

– векторная форма записи напряжённости электрического поля

$$\overline{E}_{q1} = \frac{\overline{F}}{q_2} = k\frac{q_1\overline{r}}{r^3}. \qquad (1.3)$$

Если в качестве источника электрического поля воспринимается заряд q_2, то пробным зарядом является q_1. *В* этом случае напряжённость электрического поля (E_{q2} и $\overline{E}_{q2}$) определяется равенствами:

$$E_{q2} = \frac{F}{q_1} = k\frac{q_2}{r^2};$$

$$\overline{E}_{q2} = \frac{\overline{F}}{q_1} = k\frac{q_2\overline{r}}{r^3}.$$

Согласно (1.2) модуль силы, действующей на пробный заряд (q_2), можно представить произведением: $F = q_2 \cdot E_{q1}$, подобно тому как сила, воздействующая гравитационным полем Земли на массу m описывается равенством: $F_m = mg$. Развивая аналогию, можно утверждать, что подобно тому как потенциальная энергия взаимодействия (W_m) тела с Землей, поднятого над поверхностью на высоту h, определяется равенством: $W_m = mgh$, потенциальная энергия взаимодействия (W) пробного заряда q_2 с источником электрического поля, удаленным от пробного заряда на расстояние r, рассчитывается по формуле:

$$W = q_2 E_{q1} r.$$

Так как $q_2 \cdot E_{q1} = F$, то

$$W = F \cdot r.$$

Отношение W к величине пробного заряда называется потенциалом электростатического поля (φ)

$$\varphi = \frac{W}{q_2}.$$

В системе СИ [φ] = Дж/Кл; 1 Дж/Кл ≡ 1 В (1 вольт).

Согласно (1.3) и последним двум равенствам

$$E_q = \frac{F}{q} = \frac{F \cdot \varphi}{W} = \frac{F \cdot \varphi}{F \cdot r} = \frac{\varphi}{r}. \qquad (1.4)$$

А поскольку $\left[\frac{\varphi}{r}\right] = \frac{\text{В}}{\text{м}}$, то в системе СИ $[E] = \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Из (1.4) вытекает, что

$$\varphi = E_q \cdot r.$$

Потенциал, в отличие от напряжённости является скалярной величиной, характеризующей энергию электростатического поля. Разность потенциалов между двумя точками электростатического поля называется напряжением (U):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где φ_1 – потенциал точки, расположенной на меньшем расстоянии от источника электрического поля по сравнению с точкой потенциала φ_2. Напряжение, создаваемое в разных точках пространства зарядом q можно рассчитывать по формуле:

$$U = kq\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right),$$

где r_1 и r_2 расстояния от различных точек пространства до заряда.

Действительно, обозначив через E', W', F' соответственно напряжённость, потенциальную энергию и силу, создаваемую зарядом на расстоянии r_1, а через E'', W'', F'' – на расстоянии r_2, можем записать:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = E'r_1 - E''r_2 = k\frac{q_1}{r_1^2}r_1 - k\frac{q_1}{r_2^2}r_2 = kq_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

или $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \dfrac{W'}{q_2} - \dfrac{W''}{q_2} = \dfrac{q_2 E' r_1}{q_2} - \dfrac{q_2 E'' r_1}{q_2} = E' r_1 - E'' r_2 = k q_1 \left(\dfrac{1}{r_1} - \dfrac{1}{r_2} \right),$

или $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \dfrac{W'}{q_2} - \dfrac{W''}{q_2} = \dfrac{F' r_1}{q_2} - \dfrac{F'' r_2}{q_2} = k q_1 \left(\dfrac{1}{r_1} - \dfrac{1}{r_2} \right).$

Примеры решения задач

Задача 1

Во сколько раз сила отталкивания ($F_о$) превышает силу притяжения ($F_п$) двух протонов, обладающих массой по $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг и зарядом по $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Дано:

$q_1 = q_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

$m_1 = m_2 = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг

$F_о / F_п$ – ?

Решение

$$F_о = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}; \quad F_п = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2};$$

$$F_о / F_п = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \Big/ \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} =$$

$$= k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{r^2}{\gamma \cdot m_1 \cdot m_2} = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{\gamma \cdot m_1 \cdot m_2};$$

$$F_о / F_п = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \left(1{,}67 \cdot 10^{-27}\right)^2} = 1{,}24 \cdot 10^{36}.$$

Ответ: сила отталкивания превышает силу притяжения в $1{,}24 \cdot 10^{36}$ раз ($F_о / F_п = 1{,}24 \cdot 10^{36}$).

Задача 2

Рассчитать абсолютное значение (модуль) силы отталкивания двух точечных положительных зарядов, один из которых 0,5 нКл, а другой 1,5 нКл и находится на расстоянии 3,0 м от первого. Определить для этого расстояния:

– модуль напряжённости, создаваемый первым зарядом и модуль напряжённости, создаваемый вторым зарядом;

– координаты вектора напряжённости, создаваемого первым зарядом в точке (1; 2; 2) м;

– потенциальную энергию взаимодействия этих зарядов;

– потенциал электростатического поля, создаваемого вторым зарядом в точке нахождения первого заряда.

Вычислить напряжение, создаваемое первым зарядом, между точками, находящимися от него на расстоянии 2 см и 4 см.

Дано:

$q_1 = 5{,}0\cdot10^{-10}$ Кл
$q_2 = 1{,}5\cdot10^{-9}$ Кл
$r = 3{,}0$ м
$\overline{r} = \left(\overline{i} + 2\overline{j} + 2\overline{k}\right)$ м
$r_1 = 2{,}0\cdot10^{-2}$ м
$r_1 = 4{,}0\cdot10^{-2}$ м

F – ?
E_{q1} – ?
E_{q2} – ?
$\overline{E}_{q1}$ – ?
W – ?
φ – ?
U – ?

Решение:

$$F = k\frac{q_1\cdot q_2}{r^2};\quad E_{q1} = \frac{F}{q_2};\quad E_{q2} = \frac{F}{q_1};\quad \overline{E}_{q1} = \frac{\overline{F}}{q_2} = k\frac{q_1\overline{r}}{r^3};$$

$$W = F\cdot r;\quad \varphi = \frac{W}{q_1};\quad U = kq_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right).$$

Подставив в полученные равенства значения величин, приведённых в «дано», получим:

$$F = 9{,}0\cdot10^9\cdot\frac{5{,}0\cdot1{,}5\cdot10^{-19}}{3{,}0^2} = 7{,}5\cdot10^{-10}\ (\text{Н});$$

$$E_{q1} = \frac{7{,}5\cdot10^{-10}}{1{,}5\cdot10^{-9}} = 5{,}0\cdot10^{-1}\ (\text{В/м});$$

$$E_{q2} = \frac{7{,}5\cdot10^{-10}}{5{,}0\cdot10^{-10}} = 1{,}5\ (\text{В/м});$$

$$\overline{E}_{q1} = 9{,}0\cdot10^9\,\frac{5{,}0\cdot10^{-10}}{3^3}\cdot\left(\overline{i} + 2\overline{j} + 2\overline{k}\right) \approx$$

$$\approx\left(1{,}7\overline{i} + 3{,}4\overline{j} + 3{,}4\overline{k}\right)\cdot10^{-1}\ (\text{В/м});$$

$$W = 7{,}5\cdot10^{-10}\cdot3 = 2{,}25\cdot10^{-9}\ (\text{Дж});\qquad \varphi = \frac{2{,}25\cdot10^{-9}}{5{,}0\cdot10^{-10}} = 4{,}5\ (\text{В});$$

$$U = 9{,}0\cdot10^9\cdot5{,}0\cdot10^{-10}\cdot\left(\frac{1}{0{,}02} - \frac{1}{0{,}04}\right) = 1{,}125\cdot10^2\ (\text{В}).$$

Ответ: $F = 7{,}5\cdot10^{-10}$ Н; $E_{q1} = 5{,}0\cdot10^{-1}$ В/м; $E_{q2} = 1{,}5$ В/м;

$\overline{E}_{q1}\left(1{,}7\cdot10^{-1}\ \text{В/м};\ 3{,}4\cdot10^{-1}\ \text{В/м};\ 3{,}4\cdot10^{-1}\ \text{В/м}\right)$;

$W = 2{,}25\cdot10^{-9}$ Дж; φ = 4,5 В; $U = 1{,}125\cdot10^2$ В

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать абсолютное значение силы отталкивания двух точечных положительных зарядов, один из которых 2 мкКл, а другой 3 мкКл и находится на расстоянии 3,7 м от первого. Определить для этого расстояния:

– модуль напряжённости, создаваемый первым зарядом и модуль напряжённости, создаваемый вторым зарядом;

– координаты вектора напряжённости, создаваемого вторым зарядом в точке (1; 2; 3) м;

– потенциальную энергию взаимодействия этих зарядов;

– потенциал электростатического поля, создаваемого первым зарядом в точке нахождения второго заряда.

Вычислить напряжение, создаваемое вторым зарядом, между точками, находящимися от него на расстоянии 4 мм и 8мм.

2. Определить величину зарядов, притягивающихся друг к другу на расстоянии 5 см с силой 705,6 Н, если известно, что модули этих зарядов равны.

---

1. Какой величиной характеризуется электрическое поле?
2. Сформулируйте закон Кулона.
3. Что такое напряжение и потенциал?

§ 1.1.4. Магнитное поле

Магнитное поле характеризуется величиной $\overline{B}$, которую принято называть «вектор магнитной индукции» (рис. 1.6).

Вектор магнитной индукции – это условная мера силы, действующей на движущийся заряд.

Вектор магнитной индукции является **псевдо**векторной величиной, потому что в направлении, им обозначаемом, нет никакого движения или изменения. Однако, подобно тому как, зная температуру (T) тела можно определить кинетическую энергию молекул ($E_к$), составляющих его[6] с помощью вектора магнитной индукции можно определить направление и величину силы, действующей на движущийся заряд. Направление силы определяется правилом левой руки:

«*Если левую руку расположить так, чтобы четыре пальца ладони были направлены по движению положительно заряженной частицы, а вектор магнитной индукции входил в ладонь, то отставленный на* 90° *большой палец покажет направление действующей на частицу силы*» (рис. 1.9).

[6] $E_к = 3/2kT$, где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

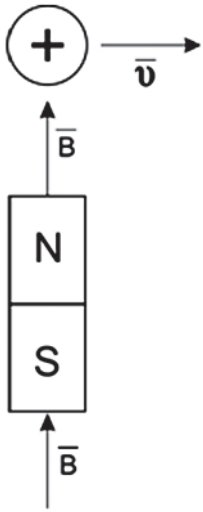


Рис. 1.9. Иллюстрация правила левой руки: сила, действующая на движущийся заряд, перпендикулярна плоскости рисунка и направлена на читателя

Модуль этой силы ($F_л$), определяется равенством:

$$F_л = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha, \qquad (1.5)$$

где q, v, B – абсолютные значения заряда, скорости движения заряженной частицы, вектора магнитной индукции соответственно; α – минимальный положительный угол[7], образуемый векторами скорости и магнитной индукции. Сила, определяемая равенством (1.5) называется *силой Лоренца*. Согласно (1.5):

$$[B] = \left[\frac{F_л}{qv}\right] = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}; \quad 1\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{ Тл } (\text{Тесла}).$$

Математически правило левой руки записывается с помощью векторного произведения[8]:

$$\frac{\bar{F}_Л}{q} = [\bar{v} \cdot \bar{B}]$$

или

$$\bar{F}_Л = q[\bar{v} \cdot \bar{B}],$$

где q – алгебраическая[9] величина движущегося заряда.

Направление самого вектора магнитной индукции определяют правилом, которое называют правилом правого винта или правилом буравчика:

Если направление движения положительного заряда совпадает с направлением поступательного движения буравчика (правого винта), то направление вращения ручки буравчика (шляпки правого винта) совпадает с направлением вектора магнитной индукции (рис. 1.6). При этом, абсолютное значение вектора магнитной индукции, определяется формулой:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{qv\sin\alpha}{r^2},$$

где $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (1 Гн ≡ 1 Тл·м²/А); r – модуль радиус-вектора $\bar{r}$, проведённого из движущегося заряда, в рассматриваемую точку поля; v – абсолютное значение вектора скорости

[7] В дальнейшем будет называться просто «угол».

[8] Подробности о векторном произведении изложены в учебном пособии Шепель О.М., Заводенко Е.М. Математика и информатика – Томск: Издательский дом ТГУ, 2015, 236 с.

[9] То есть, может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

движения; α – угол между векторами $\overline{r}$ и $\overline{v}$. Вместо правила буравчика можно использовать строгую математическую запись:

$$\overline{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\cdot[\overline{v}\cdot\overline{r}]}{r^3}.$$

Наряду с понятием «вектор магнитной индукции» нередко используют в расчётах такую величину, как «напряжённость магнитного поля» ($\overline{H}$), которая для условий вакуума вычисляется по следующим уравнениям:

$$\overline{H} = \frac{\overline{B}}{\mu_0} = \frac{q[\overline{v}\cdot\overline{r}]}{4\pi\cdot r^3}$$

или

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{qv\sin\alpha}{4\pi\cdot r^2}.$$

Линия, касательные к которой в любой точке являются вектором магнитной индукции называется магнитной линией. С помощью магнитных линий рис. 1.6 можно преобразовать в рис. 1.10.

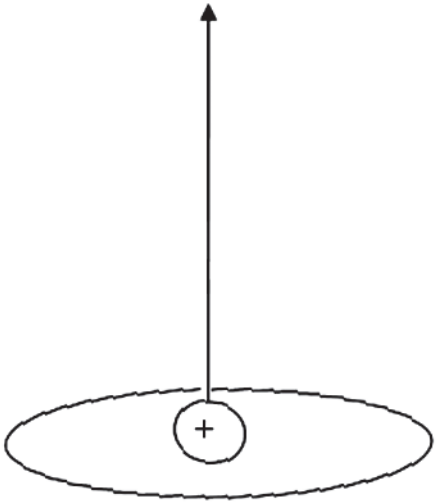


Рис. 1.10 Магнитные линии, создаваемые движущимся зарядом

Следует отметить, что хотя магнитное поле является вихревым, однако, если траектория движения потока заряженных частиц представляет собой спираль с большим количеством колец, плотно прижатых друг

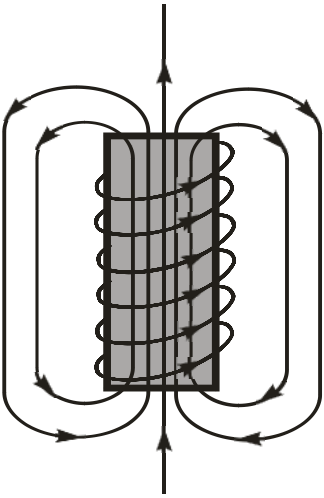


Рис. 1.11. Соленоид

к другу (соленоид), то внутри этой спирали магнитное поле можно считать практически однородным. То есть вектор магнитной индукции одинаков по направлению и по модулю внутри соленоида, на протяжении всей его длины (рис. 1.11).

Стрелки на спирали символизируют направление движения положительно заряженных частиц. Стрелки, выходящие из соленоида и входящие в соленоид символизируют направление вектора магнитной индукции. Именно этим и обусловлены свойства магнитов, внутри которых непрерывно текут одинаково ориентированные замкнутые токи электронов (рис. 1.12).

При этом не следует забывать, что поскольку электроны являются отрицательно заряженными частицами, то на самом деле они движутся в направлении противоположном тому, которое считается направлением движения заряженных частиц и указанному на рис. 1.11, 1.12.

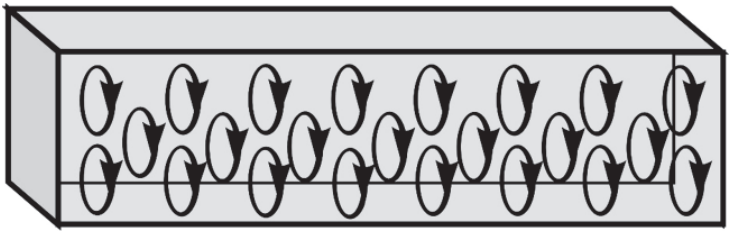


Рис. 1.12. Схема строения магнита

Примеры решения задач

Задача 1

Определить координаты и модуль силы Лоренца, воздействующей на движущийся точечный заряд 2 нКл, вектор скорости которого имеет координаты ($3\cdot10^7$; $2\cdot10^7$; $1\cdot10^7$) м/с, а координаты вектора магнитно й индукции (0,1; 0,2; 0,3) Тл.

Дано:	*Решение*
$q = 2\cdot10^{-9}$ Кл;	$\overline{F}_{Л} = q\left[\overline{v}\,\overline{B}\right]$;
$\overline{v} = \left(3\cdot10^{7} + 2\cdot10^{7} + 1\cdot10^{7}\right)$ м/с;	$\left[\overline{v}\,\overline{B}\right] = \begin{vmatrix} 2\cdot10^{7} & 1\cdot10^{7} \\ 0{,}2 & 0{,}3 \end{vmatrix}\overline{i} + \begin{vmatrix} 1\cdot10^{7} & 3\cdot10^{7} \\ 0{,}3 & 0{,}1 \end{vmatrix}\overline{j} + \begin{vmatrix} 3\cdot10^{7} & 2\cdot10^{7} \\ 0{,}1 & 0{,}2 \end{vmatrix}\overline{k} =$
$\overline{B} = \left(0{,}1\overline{i} + 0{,}2\overline{j} + 0{,}3\overline{k}\right)$ Тл	$= \left(2\cdot0{,}3\cdot10^{7} - 1\cdot0{,}2\cdot10^{7}\right) + \left(1\cdot0{,}1\cdot10^{7} - 3\cdot0{,}3\cdot10^{7}\right) +$
$\overline{F}_{Л} - ?$	$+\left(3\cdot0{,}2\cdot10^{7} - 2\cdot0{,}1\cdot10^{7}\right) =$
$F_{л} - ?$	$= \left(0{,}4\cdot10^{7} - 0{,}8\cdot10^{7} + 0{,}4\cdot10^{7}\right)$ (Тл·м/с);

$$\overline{F}_{Л} = 2\cdot10^{-9}\cdot\left(0{,}4\cdot10^{7}\,\overline{i} - 0{,}8\cdot10^{7}\,\overline{j} + 0{,}4\cdot10^{7}\,\overline{k}\right)\ (\text{Н});$$

$$\overline{F}_{Л} = \left(8\cdot10^{-3} - 1{,}6\cdot10^{-2} + 8\cdot10^{-3}\right)\ (\text{Н});$$

$$F_{л} = \left|\sqrt{\left(8\cdot10^{-3}\right)^{2} + \left(-1{,}6\cdot10^{-2}\right)^{2} + \left(8\cdot10^{-3}\right)^{2}}\right| \approx 1{,}96\cdot10^{-2}\ (\text{Н});$$

Ответ: $\overline{F}_{Л}$ ($8\cdot10^{-3}$ Н; $-1{,}6\cdot10^{-2}$ Н; $8\cdot10^{-3}$ Н); $F_{л} \approx 1{,}96\cdot10^{-2}$ Н.

Задача 2

Рассчитать координаты и модуль силы Лоренца, воздействующей на движущийся точечный заряд 2 нКл, вектор скорости которого имеет координаты ($3\cdot10^{7}$; $2\cdot10^{7}$; $1\cdot10^{7}$) м/с, а координаты вектора магнитной индукции (0,15; 0,10; 0,05) Тл. Чему равен угол между направлениями вектора магнитной индукции и вектора скорости движения заряженной частицы?

Дано:	*Решение*
$q = 2$ нКл;	$\overline{F}_{Л} = q\left[\overline{v}\,\overline{B}\right]$.
$\overline{v} = \left(3\cdot10^{7} + 2\cdot10^{7} + 1\cdot10^{7}\right)$ м/с	Выполняя действия, аналогичные действиям предыдущей задачи, получим:
$\overline{B} = \left(0{,}15\overline{i} + 0{,}10\overline{j} + 0{,}05\overline{k}\right)$ Тл	$\left[\overline{v}\,\overline{B}\right] = \left(0\overline{i} + 0\overline{j} + 0\overline{k}\right)$ (Тл·м/с).
$\overline{F}_{Л} - ?$	Следовательно:
$F_{л} - ?$	$\overline{F}_{Л} = \left(0\overline{i} + 0\overline{j} + 0\overline{k}\right)$ (Н);
$\alpha - ?$	$F_{л} = 0$ (Н).

Нулевое значение силы Лоренца свидетельствует о том, что sin α = 0, то есть, векторы $\overline{v}$ и $\overline{B}$ коллинеарны – лежат на одной прямой. Поскольку, значения координат обоих векторов больше 0, то эти коллинеарные векторы равнонаправлены, то есть α = 0.

Ответ: $F_л$ (0 Н; 0 Н; 0 Н); $F_л$ = 0 Н; α = 0.

Задача 3

Для точки с координатами (1; 1; 1) м рассчитать координаты и модуль вектора магнитной индукции, создаваемого зарядом 0,1 мкКл, движущимся со скоростью, координаты которой ($3\cdot10^5$; $2\cdot10^5$; $1\cdot10^5$) м/с.

Дано:	*Решение*
$q = 1\cdot10^{-7}$ Кл $\overline{v} = \left(3\cdot10^5\overline{i} + 2\cdot10^5\overline{j} + 1\cdot10^5\overline{k}\right)$ м/с $\overline{r} = \left(\overline{i} + \overline{j} + \overline{k}\right)$ м	$\overline{B} = \frac{\mu_O}{4\pi}\frac{q\,[\overline{v}\cdot\overline{r}]}{r^3}$; $[\overline{v}\cdot\overline{r}] = \left(1\cdot10^5\overline{i} - 2\cdot10^5\overline{j} + 1\cdot10^5\overline{k}\right)\left(\text{м}^2/\text{с}\right)$.
$\overline{B}$ – ? B – ?	Поскольку $r = \left\lvert\sqrt{1^2+1^2+1^2}\right\rvert = \left\lvert\sqrt{3}\right\rvert(\text{м})$, то

$$\frac{\mu_O q}{4\pi\cdot r^3} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot1\cdot10^{-7}}{4\pi\left(\sqrt{3}\right)^3} \approx 1{,}9\cdot10^{-15}\left((\text{Гн}\cdot\text{Кл})/\text{м}^4\right).$$

Поэтому:

$$\overline{B} \approx \left(1{,}9\cdot10^{-15}\left(1\cdot10^5\overline{i} - 2\cdot10^5\overline{j} + 1\cdot10^5\overline{k}\right)\right)\ (\text{Тл});$$

$$\overline{B} \approx \left(1{,}9\cdot10^{-10}\overline{i} - 3{,}8\cdot10^{-10}\overline{j} + 1{,}9\cdot10^{-10}\overline{k}\right)\ (\text{Тл});$$

$$B \approx \sqrt{\left(1{,}9\cdot10^{-10}\right)^2 + \left(-3{,}8\cdot10^{-10}\right)^2 + \left(1{,}9\cdot10^{-10}\right)^2} \approx 4{,}7\cdot10^{-10}\ (\text{Тл}).$$

Ответ: $\overline{B}$ ($1{,}9\cdot10^{-10}$ Тл; – $3{,}8\cdot10^{-10}$ Тл; $1{,}9\cdot10^{-10}$ Тл); $B \approx 4{,}7\cdot10^{-10}$ Тл.

Задача 4

Какова длина радиус-вектора, проведённого от заряда, рассмотренного в предыдущей задаче, к точке, в которой абсолютное значение вектора магнитной индукции составляет 4,6 мТл, если этот радиус-вектор перпендикулярен направлению движения заряда?

Дано:	*Решение*
$q = 1\cdot10^{-7}$ Кл $\overline{v} = \left(3\cdot10^5\,\overline{i} + 2\cdot10^5\,\overline{j} + 1\cdot10^5\,\overline{k}\right)$ м/с $B = 4{,}6\cdot10^{-3}$ Тл $\alpha = 90°$	$\sqrt{v = (3\cdot10^5)^2 + (2\cdot10^5)^2 + (1\cdot10^5)^2} \approx$ $\approx 3{,}7\cdot10^5$ (м/с); $B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{qv\sin\alpha}{r^2}$;
r – ?	

$$r = \sqrt{\frac{\mu_0 qv\cdot\sin\alpha}{4\pi B}};$$

$$r = \sqrt{\frac{10^{-7}\cdot1\cdot10^{-7}\cdot3{,}7\cdot10^5}{4{,}6\cdot10^{-3}}} \approx 9\cdot10^{-4}\text{ м}.$$

Ответ: $r \approx 9\cdot10^{-4}$ м

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить направление (северное, южное, западное, восточное) и абсолютное значение силы Лоренца, действующей на электрон ($-1{,}6\cdot10^{-10}$ нКл), движущийся в вакууме с севера на юг со скоростью $3\cdot10^3$ км/с в магнитном поле с напряжённостью $\frac{0{,}5}{4\pi}$ мА/м, направленном на электрон снизу под углом к вектору скорости его движения, составляющим:

а) 90°

б) 45°

в) 30°

2. Определить направление (северное, южное, западное, восточное) и абсолютное значение вектора магнитной индукции, создаваемого протоном ($1{,}6\cdot10^{-10}$ нКл), движущимся со скоростью $3\cdot10^3$ км/с сверху вниз, в точке,

а) расположенной ***западнее протона*** на расстоянии $r = 3$ см от него и образующей с протоном радиус-вектор, составляющий с вектором движения протона плоский угол $\boldsymbol{\beta_1 = 90°}$;

б)) расположенной в плоскости угла $\boldsymbol{\beta_1}$, но образующей с протоном радиус-вектор, составляющий с вектором движения протона угол $\boldsymbol{\beta_2 = 45°}$;

в) $\boldsymbol{\beta_3 = 30°}$;

г) $\boldsymbol{\beta_4 = 0°}$;

д) $\boldsymbol{\beta_5 = 150°}$.

3. Определить координаты и модуль силы Лоренца, воздействующей на движущийся точечный заряд $1\cdot10^{-7}$ Кл, вектор скорости которого имеет координаты ($2\cdot10^6$; $1\cdot10^5$; $3\cdot10^5$) м/с, а координаты вектора магнитной индукции (0,1; –0,2; 0,1) Тл.

4. Определить координаты и модуль силы Лоренца, воздействующей на движущийся точечный заряд $0{,}5\cdot10^{-8}$ Кл, вектор скорости которого имеет координаты ($6\cdot10^5$; $-4\cdot10^5$; $8\cdot10^5$) м/с, а координаты вектора магнитной индукции (–0,3; 0,2; –0,4) Тл. Чему равен угол α между направлениями вектора магнитной индукции и вектора скорости движения заряженной частицы?

5. Для точки ($\sqrt{2}$; 1; 1) м определить координаты и модуль вектора магнитной индукции, создаваемой зарядом 0,3 мкКл, движущимся со скоростью, координаты которой ($1\cdot10^4$; $1\cdot10^4$; $1\cdot10^5$) км/с.

6. Какова длина радиус-вектора, проведённого от заряда, рассмотренного в предыдущей задаче, к точке, в которой абсолютное значение вектора магнитной индукции составляет 3 мТл, если этот радиус-вектор перпендикулярен направлению движения заряда?

---

1. Какой величиной характеризуется магнитное поле?
2. Сформулируйте правило левой руки и правило правого винта (буравчика).
3. Почему соленоиды проявляют свойства магнитов?

§ 1.1.5. Вращение заряженной частицы в потоке магнитной индукции

Ускорение заряженной частицы под действием силы Лоренца нормальное ($\overline{a}_n$), то есть, направлено перпендикулярно скорости её движения, а значит, изменяет направление движения частицы, но не изменяет значения модуля скорости её движения. Это приводит к тому, что заряженная частица, движущаяся в постоянном магнитном поле начинает вращаться по окружности с радиусом *r*. Нормальное ускорение определяется формулами:

$$a_n = \frac{v^2}{r} \text{ – скалярная форма уравнения;}$$

$$\overline{a}_n = -\frac{v^2}{r^2}\cdot\overline{r} \text{ – векторная форма уравнения,}$$

где $\overline{r}$ – радиус-вектор, проведённый из центра окружности в точку движения – абсолютное значение скорости.

Согласно второму закону Ньютона ($F = ma$ или $\overline{F} = m\overline{a}$):

$$m \cdot a_n = m\frac{v^2}{r} = F_л = q \cdot v \cdot \sin\alpha,$$

где q, v, B – абсолютные значения заряда, скорости движения заряженной частицы, вектора магнитной индукции соответственно; α – угол, образуемый векторами скорости и магнитной индукции.

Или
$$m \cdot \overline{a}_n = -m\frac{v^2}{r^2}\overline{r} = \overline{F}_л = q\left[\overline{v} \cdot \overline{B}\right].$$

Из двух последних выражений следует, что

$$r = m\frac{v^2}{qvB\sin\alpha} = m\frac{v}{qB\sin\alpha}; \qquad (1.6)$$

$$\overline{r} = -\frac{qr^2\left[\overline{v} \cdot \overline{B}\right]}{mv^2}. \qquad (1.7)$$

То есть, заряженная частица с массой m и зарядом q, движущаяся со скоростью v в постоянном магнитном поле, обладающем вектором магнитной индукции B, будет вращаться по окружности с радиусом, определяемым формулой (1.6). Направление движения вращающейся частицы, естественно, всё время меняется, поэтому и направление соответствующего радиус-вектора также непрерывно меняется и определяется равенством (1.7).

Примеры решения задач

Задача 1

Определить радиус окружности, по которой со скоростью 3 м/с вращается заряженная частица 2 мкКл массой 0,1 мг, находящаяся в магнитном поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен направлению движения этой частицы и составляет 0,4 Тл.

Дано:	*Решение*
$v = 3$ м/с $q = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл $m = 1 \cdot 10^{-7}$ кг $B = 0{,}4$ Тл	На основании (1.6) можем записать $r = m\dfrac{v}{qB\sin\alpha}$. Поскольку по условию задачи вектор магнитной индукции перпендикулярен направлению движения заряженной частицы, то $\sin\alpha = 1$. Поэтому в данном случае
r – ?	

$$r = m\frac{v}{qB}; \quad r = \frac{3 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}4} = 0{,}375\text{ м}.$$

Ответ: $r = 0{,}375$ м.

Задача 2

Установить координаты радиус-вектора заряда 5 мкКл, вращающегося в магнитном поле по окружности радиусом 0,5 м и обладающего массой 0,3 мг, для момента времени, при котором координаты скорости приобрели значения (1; 2; 3) м/с. При этом $\overline{B}$ (0,3; 0,2; 0,1) Тл.

Дано:	*Решение*
$q = 5\cdot10^{-6}$ Кл $r = 5\cdot10^{-1}$ м $m = 3\cdot10^{-7}$ кг $\overline{v} = \left(\overline{i} + 2\overline{j} + 3\overline{k}\right)$ м/с $\overline{B} = \left(3\overline{i} + 2\overline{j} + \overline{k}\right)$ Тл	На основании (1.7) можем записать $\overline{r} = -\dfrac{qr^2\left[\overline{v}\cdot\overline{B}\right]}{mv^2}.$ Поскольку $v^2 = 1^2 + 2^2 + 3^2 = 14$ (м²/с²), то $\dfrac{qr^2}{mv^2} = \dfrac{5\cdot10^{-6}\left(5\cdot10^{-1}\right)^2}{3\cdot14\cdot10^{-7}} \approx 3\cdot10^{-1}\left(\left(\text{Кл}\cdot\text{с}^2\right)/\text{кг}\right).$
$\overline{r}$ – ?	

Поэтому:

$$\overline{r} \approx -0,3\cdot\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 0,2 & 0,1 \end{vmatrix}\overline{i} - 0,3\cdot\begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 0,1 & 0,3 \end{vmatrix}\overline{j} - 0,3\cdot\begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 0,3 & 0,2 \end{vmatrix}\overline{k} =$$

$$= -0,3\cdot\left(2\cdot0,1 - 3\cdot0,2\right)\overline{i} - 0,3\cdot\left(3\cdot0,3 - 1\cdot0,1\right)\overline{j} -$$

$$-0,3\cdot\left(1\cdot0,2 - 2\cdot0,3\right)\overline{k} =$$

$$= (0,12\overline{i} - 0,24\overline{j} + 0,12\overline{k})\left(\text{м}\right).$$

Ответ: $\overline{r}$ (0,12 м; –0,24 м; 0,12 м).

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить массу заряда 0,4 мкКл, вращающегося со скоростью 5 м/с по окружности диаметром 0,1 м, которая перпендикулярна магнитному полю с $B = 0,4$ Тл.

2. Установить координаты радиус-вектора заряда 0,3 мкКл, вращающегося в магнитном поле по окружности радиусом 0,7 м и обладающего массой 0,9 мг, для момента времени, при котором координаты скорости приобрели значения (3; 1; 2) м/с.

При этом $\overline{B}$ (0,5; 0,7; 0,9) Тл.

Почему заряженная частица, движущаяся в постоянном магнитном поле, вращается по окружности?

§ 1.1.6. Вихревое электрическое поле

Подобно тому, как движущийся электрический заряд создаёт вихревое **магнитное** поле, направление вектора индукции которого определяется правилом правого винта (рис. 1.6), переменное магнитное поле создаёт вихревое **электрическое** поле (рис. 1.13), направление напряжённости которого определяется правилом левого винта:

Если направление увеличения вектора магнитной индукции совпадает с направлением поступательного движения левого винта, то направление вращения шляпки левого винта совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля.

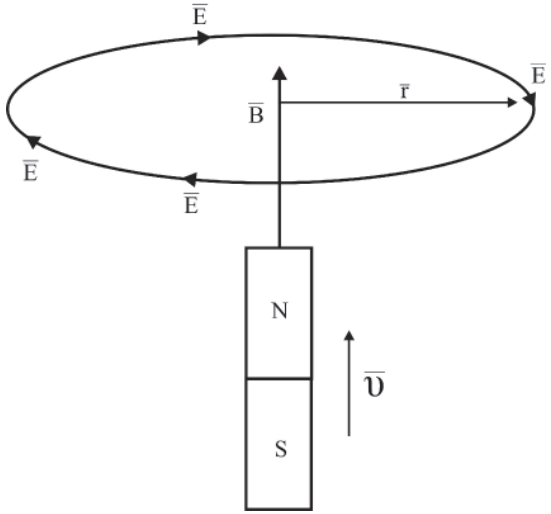


Рис. 1.13. Вихревое электрическое поле. Замкнутый контур напряжённости электрического поля перпендикулярен плоскости рисунка

Возникновение вихревого электрического поля под действием переменного магнитного поля называется явлением электромагнитной индукции (индукцией). Само вихревое электрическое поле, возникшее под действием магнитного поля, называется индуцированным электрическим полем.

На практике, переменное магнитное поле нередко получают изменением силы тока в соленоиде (рис. 1.11). Экспериментально вихревое электрическое поле можно обнаружить с помощью металлического (например, алюминиевого) кольца (проводящего контура) внутрь которого вносится магнит (рис. 1.14).

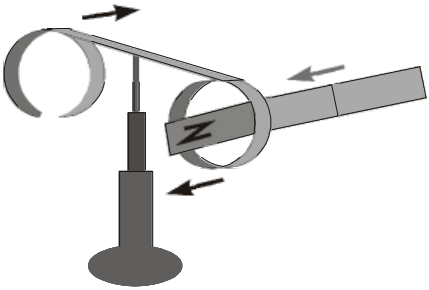


Рис. 1.14. Иллюстрация возникновения индукционного тока

Как видно из рис. 1.14 вихревое электрическое поле, вызванное движением магнита внутрь кольца, приводит к возникновению электрического тока в проводящем контуре (индукционного тока) и вектору магнитной индукции, направленному из кольца против движения магнита. Кольцо становится подобным магниту, обращённому одноимённым полюсом к приближающемуся магниту. Одноимённые же полюсы отталкиваются. Поэтому кольцо от магнита будет отталкиваться, а стержень, свободно вращающийся вокруг вертикальной оси, поворачиваться. При движении магнита из кольца направление электрического тока в проводящем контуре сменится на противоположное также как и направление вектора магнитной индукции. В результате кольцо к магниту станет притягиваться. При движении внутрь кольца южного полюса магнита поведение стержня с кольцами окажется тем же самым. Электрический ток, возникающий под действием индуцированного электрического поля называется *индукционным током*. Русским физиком Э.Х. Ленцем впервые было сформулировано общее правило определения направления индукционного тока. Согласно правилу Ленца ***возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.*** Важно отметить, что если магнит внести в другое (разрезанное) кольцо, то электрического тока в нём не возникнет и стержень не повернётся.

Работу по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура называют электродвижущей силой (ЭДС):

$$\text{ЭДС} = E \cdot 2\pi r,$$

где E – абсолютное значение вектора $\overline{E}$, замкнутого в форме окружности с радиусом r. В общем случае, для замкнутого контура длиной l произвольной формы

$$\text{ЭДС} = E \cdot l.$$

Размерность ЭДС та же, что у потенциала и напряжения (вольты).

При этом установлено, что электродвижущая сила индукции (ε_i) определяется равенством:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \tag{1.8}$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ – скорость изменения магнитного потока Ф через площадь S,

$$\Phi = BS\cdot\cos\alpha,$$

α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью (перпендикуляром) к плоскости S. Единицей магнитного потока является вебер, 1 Вб ≡ 1 Тл·1 м^2.

Знак «минус» в равенстве (1.8) означает, что:

- индуцированное вихревое электрическое поле совершает работу, противоположную по знаку работе, совершаемой переменным магнитным полем – вектор $\overline{B}$ индукционного тока противоположен направлению изменения вектора магнитной индукции переменного магнитного поля;
- направление вектора напряжённости определяется *против* правила буравчика, то есть по правилу *левого* винта.

Если скорость изменения магнитного потока на измеряемом отрезке времени Δt – постоянна, то равенство (1.8) может быть записано в интегральной форме:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$.

Сила индукционного тока (I), измеряемая в амперах (A), определяется равенством:

$$I = \frac{|\varepsilon_i|}{R},$$

где R – сопротивление проводящего контура, [R] = Ом.

Примеры решения задач

Задача 1.

Определить ЭДС индукции в контуре проводника, если за три секунды магнитный поток в этом контуре равномерно уменьшился на 0,6 мВб.

Дано:	*Решение*
$\Delta t = 3$ с $\Delta\Phi = -0{,}6$ мВб	$\varepsilon_i' = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$; $\quad \varepsilon_i' = -\dfrac{(-0{,}6)}{3} = 0{,}2$ (мВ).
ε_i' – ?	*Ответ:* $\varepsilon_i' = 0{,}2$ мВ.

Задача 2

Магнитный поток, пронизывающий контур проводника равномерно увеличился с 1,4 мВб до 2 мВб и при этом ЭДС индукции оказалась равной – 1,2 мВ. Найти время изменения магнитного потока и силу индукционного тока, если сопротивление проводника 0,24 Ом.

Дано:	*Решение*
$\Phi_1 = 1{,}4\cdot10^{-3}$ Вб $\Phi_2 = 2\cdot10^{-3}$ Вб $\varepsilon_i = -1{,}2\cdot10^{-3}$ В $R = 0{,}24$ Ом	$\varepsilon_i = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, следовательно $\Delta t = -\dfrac{\Delta\Phi}{\varepsilon_i} = -\dfrac{\Phi_2 - \Phi_1}{\varepsilon_i}$;
t – ? I – ?	$I = \dfrac{\lvert\varepsilon_i\rvert}{R}$; $\quad \Delta t = -\dfrac{2-1{,}4}{-1{,}2} = 0{,}5\ (\text{с})$; $\quad I = \dfrac{1{,}2}{0{,}24} = 5$ А.

Ответ: $\Delta t = 0{,}5$ с; $I = 5$ А

Задачи для самостоятельного решения

1. На сколько изменился магнитный поток за 5 секунд, если в течение этого времени электродвижущая сила равнялась –0,9 В? Увеличивался магнитный поток или уменьшался?

2. Магнитный поток, пронизывающий контур проводника, равномерно уменьшался с 3 Вб до 0,5 Вб, и при этом ЭДС индукции оказалась равной 2 В. Найти время изменения магнитного потока и сопротивление проводящего контура, в котором сила индукционного тока оказалась равной 0,05 А.

---

1. Сформулируйте правило левого винта.

2. Что такое индукция?

3. Как можно доказать экспериментально возникновение индуцированного электрического поля?

4. В чём заключается правило Ленца?

5. Что такое ЭДС?

§ 1.1.7. Электромагнитные волны

При взаимодействии электрических и магнитных полей, образующихся при колебательном движении электрического заряда, возникает *электромагнитная волна* (рис. 1.8), состоящая из фотонов (рис. 1.6) и бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда. При этом энергия одного фотона (E), описывается равенством:

$$E = h\nu, \tag{1.9}$$

где h – постоянная Планка:

$$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/Гц};$$

ν – частота колебаний электромагнитной волны, то есть количество колебаний (N) электромагнитного поля, совершаемых в единицу времени в данной точке пространства:

$$\nu = \frac{N}{t},$$

$[\nu]$ = Гц, 1 Гц ≡ 1 с$^{-1}$. Величина, обратная ν называется периодом колебаний (T) и представляет собой промежуток времени, через который колеблющаяся система возвращается к исходной фазе:

$$T = 1/\nu.$$

Установлено, что для электромагнитных волн:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \tag{1.10}$$

или

$$\lambda \cdot \nu = c,$$

где c – скорость движения фотона, (в вакууме $c \approx 300\,000$ км/с), которую иногда называют скоростью света; λ – длина электромагнитной волны (рис. 1.6). В прозрачных средах (воздух, вода, стекло, алмаз) скорость света меньше, чем в вакууме – определяется природой среды и длиной падающей электромагнитной волны. Длина электромагнитной волны в этих средах также уменьшается, но частота остаётся неизменной (1.10). Следует подчеркнуть, что одной и той же длине электромагнитной волны в одной и той же среде соответствует только одно значение амплитуд E_0 и B_0.

Поскольку, направление колебаний электрической и магнитной волн фотона перпендикулярно направлению его движения (поперёк), то электромагнитную волну относят к *поперечным* волнам.

Направление движения фотона можно определить по правилу буравчика (правого винта):

Если направление движения фотона совпадает с направлением поступательного движения буравчика (правого винта), то направление вращения ручки буравчика (шляпки правого винта) совпадает с направлением поворота от вектора $\overline{E}$ к вектору $\overline{B}$.

Электромагнитные волны с $4 \cdot 10^{-7}$ м $\leq \lambda \leq 8 \cdot 10^{-7}$ м воспринимаются человеком как свет. Поэтому нередко их называют световыми волнами. Причём, если $\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ м, то свет фиолетовый, а если $\lambda = 8 \cdot 10^{-7}$ м, то свет красный.

В интервале $4 \cdot 10^{-7}$ м $< \lambda < 8 \cdot 10^{-7}$ м человеческий глаз воспринимает всевозможные оттенки синего, голубого, зелёного, жёлтого и оранжевого цветов. Поток всевозможных световых волн, включающий в себя фотоны со всеми значениями от $4 \cdot 10^{-7}$ м до $8 \cdot 10^{-7}$ м, воспринимается белым цветом. Хотя в прозрачных средах, скорость распространения световой волны и её длина меняются, однако, поскольку частота остаётся неизменной, то восприятие человеческим глазом также остаётся неизменным.

Излучения электромагнитных колебаний с $\lambda > 8 \cdot 10^{-7}$ м называются: инфракрасным излучением, радиоволнами и низкочастотными колебаниями (перечислены в порядке возрастания λ).

Излучения электромагнитных колебаний с $\lambda < 4 \cdot 10^{-7}$ м называются: ультрафиолетовым излучением, рентгеновским излучением и гамма излучением (перечислены в порядке убывания).

Примеры решения задач

Задача 1

Определить цвет, который увидит наблюдатель, если его глаза воспринимают электромагнитную волну с энергией фотона $2{,}475 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Дано:	*Решение*
$E = 2{,}475 \cdot 10^{-19}$ Дж	$E = h\nu, \quad \nu = \dfrac{c}{\lambda}; \quad E = \dfrac{hc}{\lambda};$
$\lambda - ?$	$\boxed{\lambda = \dfrac{hc}{E};}$

$$\lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8} / 2{,}475 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Электромагнитная волна с $\lambda = 8 \cdot 10^{-7}$ м воспринимается человеческим зрением как красный цвет.

Ответ: наблюдатель увидит красный цвет.

Задача 2

Во сколько раз изменится (увеличится или уменьшится) длина электромагнитной волны, падающей в воду, если скорость её распространения в воде составляет 225 564 км/с.

Дано:	*Решение*
v = 22 5564 км/с	$\lambda \cdot \nu = c$, следовательно
λ/λ_v – ?	$\lambda = \dfrac{c}{\nu}$ – длина электромагнитной волны в воздухе;

$$\lambda_v = \frac{v}{\nu} \text{ – длина электромагнитной волны в воде;}$$

$$\boxed{\frac{\lambda}{\lambda_v} = \frac{c}{v}}; \quad \frac{\lambda}{\lambda_v} = \frac{300000}{225564} \approx 1{,}33.$$

Ответ: длина электромагнитной волны при падении в воду уменьшится в 1,33 раза.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить длину электромагнитной волны, воспринимаемой наблюдателем, если энергия её фотона составляет $4{,}95 \cdot 10^{-19}$ Дж.

2. Увидит ли человек электромагнитную волну, частота колебаний которой составляет 10^{13} Гц?

3. Приближается фотон к наблюдателю или удаляется от него, если минимальный угол поворота от вектора магнитной индукции к вектору напряжённости электрического поля этого фотона направлен относительно наблюдателя против часовой стрелки?

1. При каких условиях возникает электромагнитная волна?
2. Сформулируйте правило определения направления движения фотона.
3. Что такое световые волны?

§ 1.1.8. Акустическое (звуковое) поле

Акустика – это учение о звуке.

Акустическое поле – это свойство колеблющейся среды (газообразной, жидкой или твёрдой) воздействовать на слух. При этом, под колебаниями подразумевают чередующиеся во времени сжатия и разряжения среды в виде *продольной* волны (рис. 1.8), вызванные каким либо источником.

Продольная волна характеризуется периодическими изменениями свойств, происходящими *вдоль* распространения волны. В данном случае периодически изменяется плотность среды. А, поскольку внешнее давление (p), оказываемое воздухом на барабанную перепонку уха пропорционально плотности воздуха, то, именно периодическое изменение этого давления и воспринимается как звук:

$$p = \boldsymbol{\rho} RT,$$

где T – абсолютная температура (K), соотносимая с °C следующим образом 273,15 K ≡ 0 °C; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль·K; ρ – плотность воздуха (моль/м^3).

В отличие от электромагнитного поля, возникновение акустического поля в **вакууме** невозможно. Графическое изображение колеблющейся среды представляет собой *поперечную* волну (рис. 1.15).

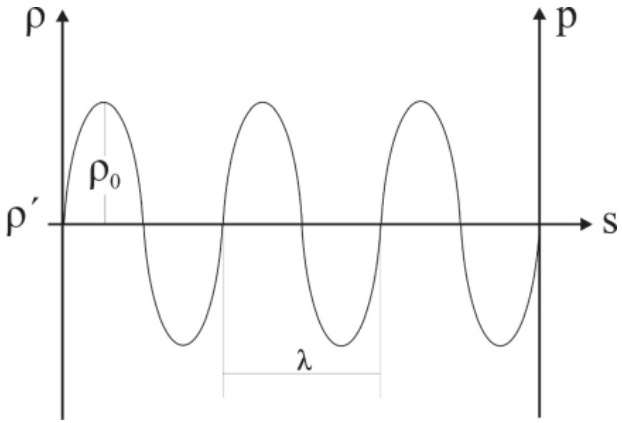


*Рис. 1.15. Зависимость плотности среды (ρ) и давления (**p**) от расстояния (**S**) до источника звука; λ – длина волны, ρ_0 – амплитуда колебания; ρ′ – среднее значение плотности среды (например, плотности воздуха, равной 1,225 кг/м^3 при 15 °C)*

Аналогично выглядит зависимость плотности среды и давления от времени для произвольно выбранной точки акустического поля (рис. 1.16).

Колебания, представленные на рис. 1.15 и 1.16 подчиняются уравнению:

$$\rho = \rho' + \rho_0 \sin 2\pi\,(t/T - S/\lambda),$$

где T – период колебаний (время единичного колебания.

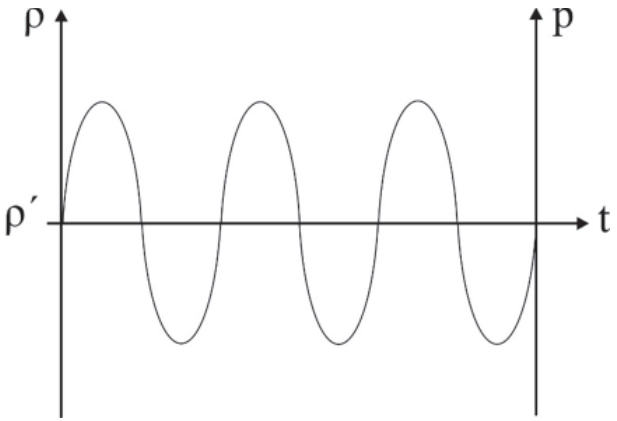


Рис. 1.16. Зависимость плотности среды и давления от времени (t)

Периодические изменения во времени физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса, называются *гармоническими колебаниями*. В реальных звукопроводящих средах амплитуда колебаний уменьшается с расстоянием вплоть до полного исчезновения (рис. 1.17) из-за рассеивания энергии волны. Такие колебания называются затухающими в пространстве.

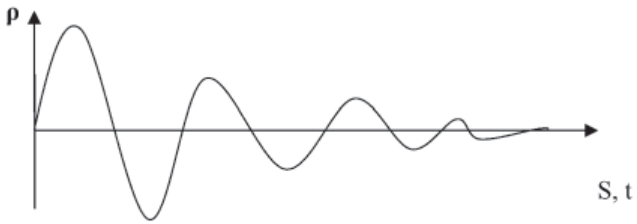


Рис. 1.17. Иллюстрация затухающего колебания

Кроме того, амплитуда колебаний среды может уменьшаться и со временем, в результате затухания колебаний источника звука, например, струны. Такие колебания называются затухающими во времени. Нередко один и тот же звук является затухающим и во времени и в пространстве.

Следует подчеркнуть, что не всегда колебание воздуха воздействует на слух, а только в том случае, если его частота находится в пределах от 17 Гц до 20000 Гц. Колебания с частотой выше 20000 Гц называются ультразвуком, ниже 17 Гц – инфразвуком. Ультразвук и инфразвук человеческим

слухом не воспринимаются. Колебания среды, частота которых лежит в пределах от 17 Гц до 20000 Гц называются *акустическими колебаниями* или *звуковыми волнами*. Человеческий слух наиболее восприимчив к частоте около 3500 Гц. При этом под частотой (ν) подразумевается количество колебаний (n) плотности среды, совершаемых в единицу времени в данной точке:

$$\nu = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}.$$

Скорость распространения продольных колебаний среды очень зависит от агрегатного состояния среды: наибольшая – в твёрдых веществах, наименьшая – в газах. Например, скорость звука (v) при 15 °С приблизительно равна:

– в воздухе 340 м/с;

– в воде 1450 м/с;

– в стали 4980 м/с.

Для всех звуковых волн, распространяющихся в любой среде, справедливо равенство:

$$\lambda \cdot \nu = v.$$

В отличие от *электромагнитной* волны (рис. 1.7), амплитуда одной и той же длины *звуковой* волны может меняться в одной и той же звукопроводящей среде (например, в воздухе). Причём, увеличение амплитуды воспринимается слухом как усиление громкости. Вместе с тем, одна и та же амплитуда звуковых волн *различной* длины воспринимается как различная громкость. Высота звука определяется частотой волны – чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук. Диапазону человеческого голоса соответствует интервал частот от 70 до 12000 Гц.

Подводя итоги изучению физических полей, выделим основные признаки тех из них, которые рассмотрели:

1. *Гравитационное поле* воздействует на массу и порождается массой.

2. *Электрическое поле* воздействует на электрический заряд и порождается электрическим зарядом. Вихревое электрическое поле порождается переменным магнитным потоком.

3. *Магнитное поле* воздействует на движущийся электрический заряд. Вихревое магнитное поле порождается поступательным движением электрического заряда.

4. *Электромагнитная волна* порождается колебательным движением заряда.

5. *Акустическое поле* воздействует на слух и порождается колебаниями источника, помещённого в звукопроводящую среду.

Примеры решения задач

Задача 1

Определить на каком расстоянии от наблюдателя сверкнула молния, если он услышал гром через 3 секунды, после того как увидел вспышку.

Дано:	*Решение*
$t = 3$ с	Каким бы ни было искомое расстояние S, но время t', затраченное светом на его преодоление, можно считать равным нулю: $t' = S/c = S$ м $/300\,000\,000$ м/с ≈ 0 с.
S – ?	

Поэтому, практически, временной интервал между моментом восприятия света и моментом восприятия звука и есть время распространения возникшего звука до наблюдателя. Полагая скорость звука v в воздухе равной 340 м/с, можно утверждать, что

$$S = v \cdot t = 340 \cdot 3 = 1020 \text{ (м)}.$$

Ответ: $S = 1020$ (м).

Задача 2

Оценить максимальную и минимальную длины волн, которые может воспринять человеческий слух в атмосфере воздуха. Услышит ли дрессировщик звук, издаваемый дельфином, если длина этой звуковой волны составляет 1 см?

Дано:	*Решение*
$\nu_1 = 17$ Гц $\nu_2 = 20000$ Гц $\lambda = 1$ см $\equiv 1 \cdot 10^{-2}$ м	$\nu = v/\lambda$; $\lambda_1 = v/\nu_1$; $\lambda_2 = v/\nu_2$;
λ_1 – ? λ_2 – ?	$\lambda_1 = 340/17 = 20$ (м) – максимальная длина волны $\lambda_2 = 340/20\,000 = 1{,}7 \cdot 10^{-2}$ (м) – минимальная длина волны

$$1 \cdot 10^{-2} < 1{,}7 \cdot 10^{-2} < 20.$$

Следовательно, звук с $\lambda = 1 \cdot 10^{-2}$ м является ультразвуком.

Ответ: $\lambda_1 = 20$ м; $\lambda_2 = 0{,}017$ м; дрессировщик не услышит звука, издаваемого дельфином.

Задачи по теме для самостоятельного решения

1. Вычислить значение атмосферного давления для температуры 15,25 °С, полагая, что молярная масса воздуха составляет 29 г/моль. Ответ округлить до целого числа.

2. Оценить длину звуковой волны, издаваемой певицей, если частота колебаний волны равна 5000 Гц.

3. Сколько колебаний сделает за 15 секунд звуковая волна в атмосфере воздуха, если её частота составляет 1000 Гц?

4. Определить внешнее давление, которое будет оказывать звуковая волна на барабанную перепонку при 15 °С через 50,5 секунд после включения источника звука с $\nu = 3{,}4 \cdot 10^3$ Гц, находящегося на расстоянии 170 м от воспринимающего уха. Через какие минимальные интервалы времени это давление будет повторяться?

---

1. Что такое акустическое поле?
2. Чем отличаются звуковые волны от инфразвука и ультразвука?
3. Укажите основные признаки полей:
– гравитационного;
– электрического;
– магнитного;
– акустического.

§ 1.1.9. Элементы термодинамики

Термодинамика – это раздел физики, изучающий закономерности движения теплоты и внутренней энергии макроскопических тел.

Физические системы, в которых рассматриваются закономерности движения теплоты и внутренней энергии макроскопических тел называются термодинамическими системами. В известном уравнении состояния идеального газа Менделеева – Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где p – давление; V – объём; m – масса; μ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная ($R \approx 8{,}31$ Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, произведение pV имеет размерность энергии. Однако, реальные газы, помимо энергии, определяемой произведением pV, обладают целым набором других видов энергии:

– энергией массы каждой молекулы ($E_0 = mc^2$);

– кинетической энергией молекул ($E_к = mv^2/2$);

– потенциальной энергией взаимодействия молекул ($E_п$);
– энергией ядерного взаимодействия между нуклонами атомов ($E_я$);
– энергией взаимодействия между электронами и ядрами ($E_э$) и т. д.

Их совокупность называют внутренней энергией (U).

Сумму $U + pV$ называют энтальпией и, как правило, обозначают буквой H:

$$H = U + pV. \tag{1.11}$$

Для жидких и твёрдых веществ $H = U$.

Энтропия

Согласно *первому закону термодинамики:*

Изменение внутренней энергии системы (U) при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил (A) и количества теплоты (Q), переданного системе:

$$\Delta U = A + \Delta Q.$$

Если внешние силы никакой работы не совершают, то

$$\Delta U = \Delta Q.$$

При этом, как известно:

$$\Delta Q = cm\,(T_2 - T_1) = \Delta Tcm,$$

где c – удельная теплоёмкость системы; m – масса; T_1 – первоначальная температура; T_2 – конечная температура. Поскольку температура T идеального газа пропорциональна средней кинетической энергии ($E_к$) его молекул:

$$E_к = \frac{3}{2}kT,$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), то можно утверждать, что внутренняя энергия увеличивается за счёт превращения подводимого тепла в кинетическую энергию молекул.

Если наоборот, вся подводимая теплота расходуется на преодоление внешних сил, которые при этом, совершают отрицательную работу (например, при расширении газа с неизменной температурой в воздушном шаре под лучами солнца):

$$\Delta Q = -A,$$

то внутренняя энергия системы при этом не изменится:

$$\Delta U = 0,$$

но, тем не менее, состояние системы станет другим. Молекулы газа после его расширения получат возможность более свободно перемещаться в пространстве – возрастёт беспорядок их движения. При этом часть энергии газа потеряет возможность производить работу (обесценится), так как некоторая работа по расширению газа окажется уже произведённой. В этом случае говорят, что возросла ЭНТРОПИЯ (S) газа, являющаяся мерой его беспорядка и обесцененной энергии. Количественное изменение этой энтропии (ΔS) определяется отношением подведённого количества теплоты ($\Delta Q_э$) к абсолютной температуре:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q_э}{T}. \tag{1.12}$$

Таким образом, [S] = Дж/К.

Для абсолютного значения энтропии:

$$S = \frac{Q_э}{T}.$$

При этом величину $Q_э$ называют энтропийной энергией:

$$Q_э = T \cdot S.$$

Другим примером возрастания энтропии и энтропийной энергии при постоянной температуре может служить превращение воды в пар при 100 °С. Или превращение льда в жидкость при температуре 0 °С.

Изменение температуры любой системы также приводит к изменению энтропии. Для идеального газа зависимость изменения энтропии от изменения температуры и объёма выглядит следующим образом:

$$\Delta S = n \cdot \left(C \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \right) \tag{1.13}$$

или в дифференциальной форме:

$$dS = n\left(C \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \right).$$

Энергия Гельмгольца и энергия Гиббса

Внутреннюю энергию (U) иногда делят на две части:

$$U = F + TS, \tag{1.14}$$

где TS – энтропийная энергия; F – сумма всех остальных составляющих внутренней энергии, которая называется *энергией Гельмгольца*.

На основании (1.11) и (1.14) энтальпию (H) можно представить суммой трёх составляющих:

$$H = F + TS + pV.$$

Если ввести обозначение

$$F + pV = G, \text{ то } H = G + TS,$$

где величина G называется свободной энергией или *энергией Гиббса*

$$G = H - TS.$$

Для изотермических процессов:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Критерии возможности самопроизвольного протекания процесса

Согласно одной из формулировок *второго закона термодинамики:* **энтропия замкнутой системы[10], при любых происходящих в ней процессах не убывает[11]:**

$$\Delta \boldsymbol{S} \geq \mathbf{0}.$$

Если процесс необратим[12], то $\Delta S > 0$, если обратим[13], то $\Delta S = 0$.

Таким образом, критерием возможности протекания процесса в замкнутой системе может служить знак изменения энтропии. Процесс возможен только в том случае, если знак изменения энтропии неотрицателен.

Действительно, трудно представить себе систему, в которой происходило бы упорядочение без обмена энергией с внешней средой. Например, перемешивание двух различных газов приводит к возрастанию беспорядка (энтропии), значит, такой процесс самопроизвольно протекать может. Обратный же процесс разделение перемешанных газов означает упорядочение, то есть, уменьшение энтропии, следовательно, такой

[10] Замкнутыми называются системы, не обменивающиеся с окружающей средой ни энергией, ни веществом.

[11] Другая формулировка этого же закона гласит, что **невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому.**

[12] Под необратимостью процесса подразумевается его протекание преимущественно только в одну сторону.

[13] Обратимость процесса в данном случае означает его протекание в противоположных направлениях с одинаковой скоростью.

процесс самопроизвольно протекать не может. Однако в открытых (незамкнутых) системах энтропия может убывать. Например, вода при 0 °C, отдавая свою внутреннюю энергию внешней среде, превращается в лёд. Критерием возможности протекания процесса в незамкнутой системе может служить знак изменения энергии Гиббса. Процесс в незамкнутой системе возможен только в том случае, если знак изменения энергии Гиббса неположителен:

$$\Delta G \leq 0,$$

то есть

$$\Delta H - T\Delta S \leq 0,$$

если $\Delta G < 0$, процесс необратим, если $\Delta G = 0$ процесс обратим. Например, для процесса замерзания воды при 0 °C справедливо равенство $H = T\Delta S$, то есть уменьшение внутренней энергии системы равно уменьшению её энтропийной энергии. Выделяющееся тепло представляет собой исключительно энергию упорядочения молекул воды в структуру льда.

$$\Delta H - T\Delta S = 0;$$

$$\Delta G = 0.$$

Это значит, что скорости процессов замерзания воды и таяния образующегося льда в этих условиях равны друг другу за счет того, что выделяющееся при кристаллизации тепло опять расходуется на плавление.

Согласно одной из формулировок *третьего закона термодинамики:* **при абсолютном нуле температуры энтропия равна нулю**[14].

То есть, при $T = 0$ K, $S = 0$.

Следует подчеркнуть условность приведённой формулировки. На самом деле оценить значение энтропии при 0 °K невозможно в принципе. Однако было доказано, что при абсолютном нуле изотермические процессы протекают без изменения энтропии. Таким образом, значение энтропии любой системы при 0 °K наименьшее, относительно которого можно измерять все изменения этой величины. Хотя и условно, но практически очень удобно, это наименьшее значение энтропии считать равным нулю.

[14] Другая формулировка: при любом изотермическом процессе, проведённом при абсолютном нуле температуры, изменение энтропии равно нулю независимо от *изменения* любых параметров состояния (давление, объём и т. д.)

Примеры решения задач

Задача 1

Определить на сколько изменится энтропия и энтропийная энергия одного моля идеального газа если его объём увеличить в 10 раз при постоянной температуре равной 25 °С?

Дано:

$n = 1$ моль

$\frac{V_2}{V_1} = 10$

$T_2 = T_1 = 25\,°C \equiv 298$ K

ΔS – ?

$\Delta Q_э$ – ?

Решение

$$\Delta S = 2,3n \cdot C \cdot \lg\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + 2,3n \cdot R \cdot \lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right).$$

Поскольку

$$T_2 = T_1, \text{ то } \Delta S = 2,3n \cdot R \cdot \lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right);$$

$$\Delta S = 2,3 \cdot 1 \cdot 8,31 \cdot \lg 10 \approx 19,1 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta Q_э = T\Delta S;$$

$$\Delta Q_э = 298 \cdot 19,1 = 5691,8 \text{ Дж}.$$

Ответ: $\Delta S \approx 19,1$ Дж/К; $\Delta Q_э \approx 5,7$ кДж.

Задача 2

Оценить на сколько изменится энтропия замкнутой системы, состоящей из двух одинаковых объёмов водорода с температурой 7 °С и 57 °С, содержащих по 2 грамма газа, если после перемешивания температура общего объёма составила 32 °С. Молярную теплоёмкость водорода считать равной 20,8 Дж/моль·К и независимой от температуры.

Дано:

$m = 2$ г $\equiv 2 \cdot 10^{-3}$ кг

$T_1 = 7\,°C \equiv 280$ K

V

$T_2 = 57\,°C \equiv 330$ K

$T = 32\,°C \equiv 305$ K

$C = 20,8$ Дж/моль·К

$M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

ΔS – ?

Решение

В данном случае общее возрастание энтропии обусловлено изменением энтропии двух составляющих системы, равные объёмы V каждой из которых удваиваются, то есть становятся равными 2.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2;$$

$$\Delta S_1 = 2,3n \cdot C \cdot \lg\left(\frac{T}{T_1}\right) + 2,3n \cdot R \cdot \lg\left(\frac{2V}{V}\right);$$

$$\Delta S_2 = 2,3n \cdot C \cdot \lg\left(\frac{T}{T_2}\right) + 2,3n \cdot R \cdot \lg\left(\frac{2V}{V}\right);$$

$$\Delta S = 2,3 \cdot \frac{m}{M} \cdot \left(2 \cdot R \cdot \lg 2 + C \cdot \left(\lg\frac{T}{T_1} + \lg\frac{T}{T_2}\right)\right);$$

$$\Delta S = 2,3 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(2 \cdot 8,31 \cdot \lg 2 + 20,8 \cdot \left(\lg\frac{305}{280} + \lg\frac{305}{330}\right)\right) \approx 11,6 \text{ Дж/К}.$$

Ответ: $\Delta S \approx 11,6$ Дж/К.

Задачи для самостоятельного решения

Задача

1. Замкнутая система состоит из двух идеальных газов, разделенных перегородкой (рис. 1. 18).

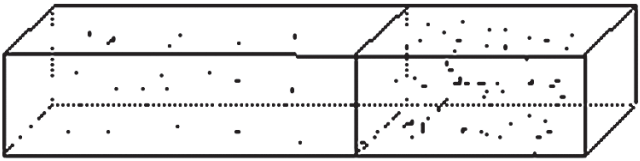


Рис. 1.18. Газы, разделённые перегородкой

Первый газ в количестве 2 моль занимает объём 3 м^3, а второй газ в количестве 3 моль занимает объём 2 м^3. На сколько изменится энтропия системы после удаления перегородки? На сколько изменится энтропийная энергия, если процесс перемешивания газов проводить при 25 °С?

2. Определить количество газа занимающего при 25 °С объём 3 л и оказывающего на стенки занимаемого им сосуда давление 10^5 Па?

1. Сформулируйте три закона термодинамики.

2. Дайте определения следующих понятий: внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, энтропийная энергия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса.

3. Каковы критерии возможности самопроизвольного протекания процесса для замкнутых и открытых систем?

1.2. Неклассическая физика

Разработка теории относительности представляла собой переход физики на принципиально новый неклассический этап, более высокий уровень развития. Поэтому прежде чем приступить к изучению основ этой теории рассмотрим некоторые основополагающие понятия неклассической физики.

Одними из основополагающих понятий неклассической физики являются:

– пространственно-временной континуум;
– событие;
– наблюдатель;
– тело;
– физическое взаимодействие;
– энергия;
– сила;
– работа;
– энтропийная энергия;
– энтропия;
– физическое поле.

Если сопоставить этот перечень понятий с перечнем для классической физики (§ 1.1), то нетрудно заметить, что пространство и время заменились пространственно-временным континуумом. Однако, значения других понятий, за исключением понятия «тело», также претерпели существенные изменения.

Пространственно-временно́й континуум в неклассической физике представляет собой бесконечную четырёхмерную протяжённость, искривляемую под действием массы тел. Четвёртым измерением (помимо длины, ширины, высоты) является расстояние, определяемое произведением ct, где c – скорость света, t – время.

Таким образом, пространство и время стали восприниматься аспектами единого целого – пространственно-временно́го континуума.

Кроме того, в неклассической физике *событие* – это точка пространственно-временного континуума, в которой происходит локальное явление. И вместо измерения времени течения какого-либо процесса и его протяжённости в пространстве измеряют расстояние между двумя событиями. Например, если лампочку включили и через 3 секунды выключили, то время её горения рассматривается как расстояние между событием включения и событием выключения лампочки и определяется произведением ct, где c – скорость света ($\approx$ 300 000 км/с), t – время. В данном случае это расстояние составляет 900 000 км. Если же за эти три секунды

горящую лампочку ещё и перенесли, скажем, на... 412 310 км, то расстояние между двумя событиями будет уже определяться квадратным корнем:

$$\sqrt{(ct)^2 - 412\,310^2} \approx \sqrt{8{,}1\cdot 10^{11} - 1{,}7\cdot 10^{11}} = 800\,000 \text{ (км)}.$$

Меняется в неклассической физике и представление о наблюдателе. Он оказывается неразрывно связанным с пространством, временем и событием. То есть, пространство, время, событие, и наблюдатель оказываются аспектами единого целого. *Наблюдатель* – один из аспектов событийно – пространственно-временного единства, движущегося от прошлого к будущему.

Обнаружилось также, что свойства физических полей обусловлены обменом элементарными частицами между взаимодействующими телами. Причём, эти частицы зачастую не являются веществами, то есть не обладают массой покоя. Например, электрическое поле, возникающее между двумя одноимённо заряженными телами, проявляет свои свойства вследствие обмена фотонами между ними.

Таким образом, с точки зрения неклассической физики *физическое поле* – это поток элементарных частиц, обеспечивающих взаимодействие между их источниками.

Изучение свойств элементарных частиц, а также открытие воздействия массы на геометрические свойства пространственно-временного континуума расширило и представления о физическом взаимодействии. Оказалось, что возможно взаимодействие с пространством. Причём, взаимодействие с пространством не только тел, состоящих из вещества, но и невещественных частиц, не обладающих массой покоя. То есть, в неклассической физике под *физическим взаимодействием* подразумевается воздействие объектов друг на друга, в отличие от классической физики, где рассматриваются только взаимодействия тел. На основании изложенного классификация взаимодействий в рамках неклассической физики схематично могла бы быть представлена следующим образом (рис. 1.19, сравните с рис. 1.1).

Однако, сравнительно недавно было доказано существование взаимодействия между запутанными частицами, заключающееся в мгновенном изменении квантового состояния одной частицы (например, спина фотона), при изменении квантового состояния другой, находящейся от первой на сколь угодно большом расстоянии. Мерой энергии взаимодействия запутанных частиц может служить работа, совершаемая при смене квантового состояния частицы. Поскольку взаимодействие запутанных частиц, также как и объектно-пространственные, не сводится к фундаментальным, то и его следует считать

отдельным типом взаимодействия. Таким образом, классификация взаимодействий, известных на сегодняшний день, приобретает вид, приведённый на рис. 1.20.

При этом, *энергия* определяется именно как количественная скалярная характеристика взаимодействия наблюдаемых объектов. Констатируется, что энергия может быть только там, где есть *взаимодействие*. И наоборот, если наблюдается взаимодействие, то оно может измеряться в единицах энергии.

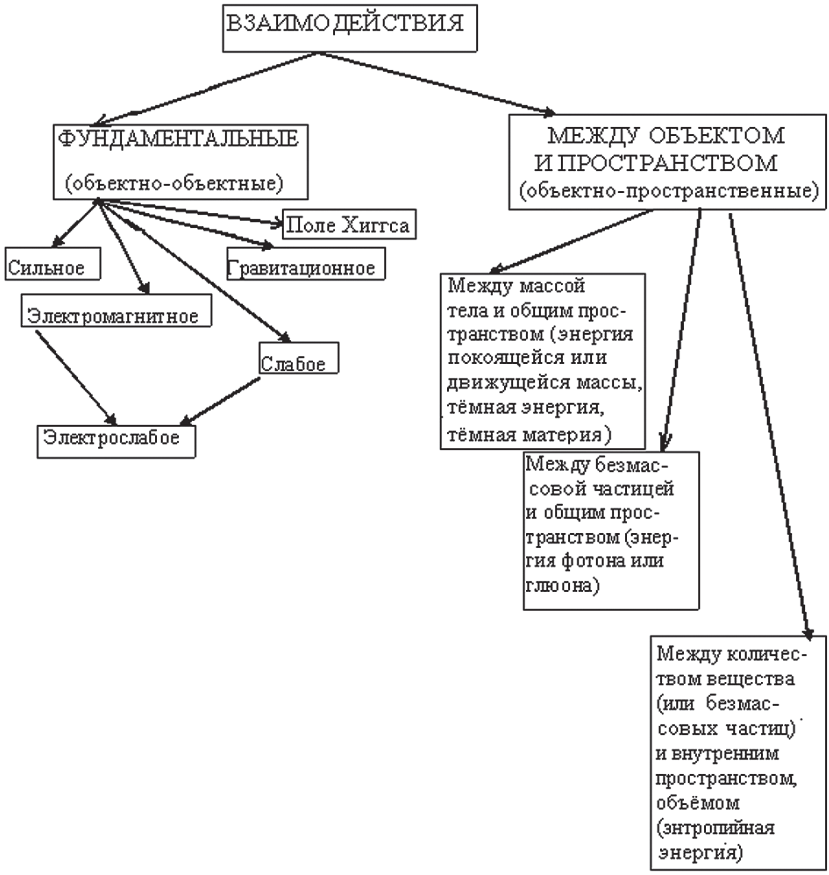


Рис. 1.19. Классификация объектно-объектных и объектно-пространственных взаимодействий

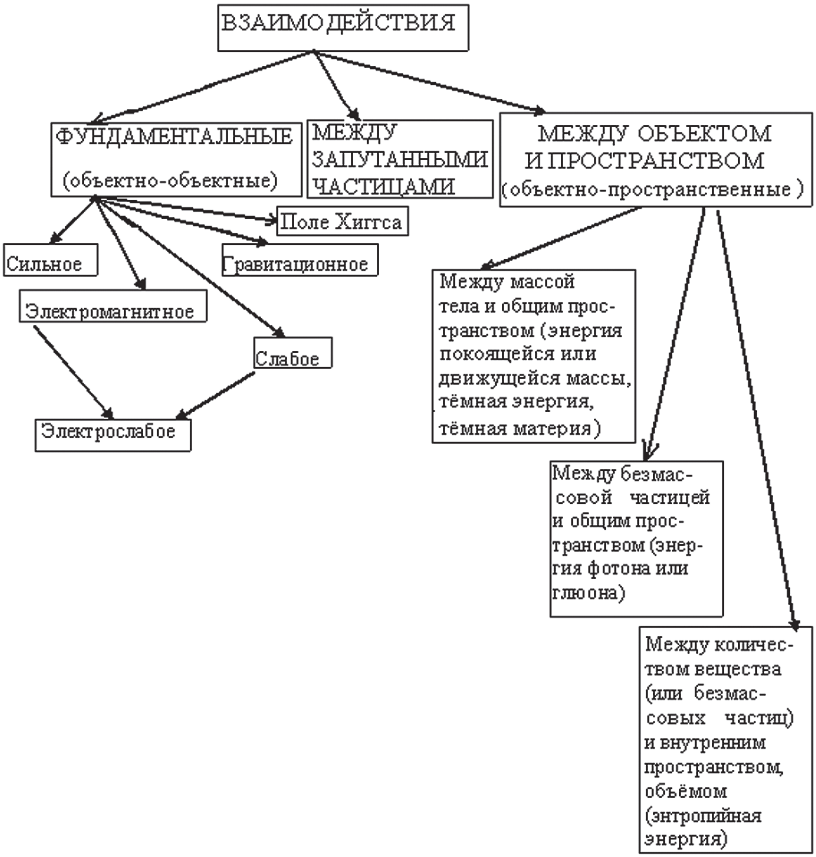


Рис. 1.20. Классификация взаимодействий, не сводимых к более элементарным взаимным воздействиям

В связи с этим претерпело изменение и представление об энтропийной энергии. В неклассической физике *энтропийная энергия* – это количественная скалярная характеристика взаимодействия количества вещества (или невещественных частиц) с занимаемым этим веществом пространством (объёмом).

Соответственно, *энтропия* – мера энтропийной энергии. *Сила* – *векторная* характеристика расхода энергии в конкретном направлении, приходящегося на единицу расстояния. *Работа* – энергия израсходованная на перемещение объекта.

При сопоставлении двух определений энтропийной энергии целесообразно подчеркнуть, что приведённое неклассическое определение принципиально отличается от классического (уравнение (1.14)) тем, что описывает энтропийную энергию не как свойство *известного* вида энергии не производить работу, а как отдельный самостоятельный вид энергии, способный увеличиваться за счёт уменьшения энергии взаимодействия с внешней средой и уменьшаться за счёт её увеличения. В этом случае энтропия (S) становится просто мерой энтропийной энергии ($Q_э$) при заданной температуре T ($Q_э = ST$). Действительно, зная, на основании уравнения 1.13, что изменение энтропийной энергии n моль газа при изменении его объёма от V_1 до V_2 при постоянной температуре T может определяться равенством:

$$\Delta Q_э = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \qquad (*)$$

и, подразумевая под энергией взаимодействия с внешней средой работу, которую может производить газ при бесконечном расширении:
где $p = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{V}$, нетрудно заметить, что

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \int_{V_2}^{\infty} pdV - \int_{V_1}^{\infty} pdV;$$

$$\Delta E = n \cdot R \cdot T \cdot \left(\int_{V_2}^{\infty} \frac{dV}{V} - \int_{V_1}^{\infty} \frac{dV}{V}\right) = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right),$$

что по абсолютной величине совпадает с уравнением (*) для расчёта изменения энтропийной энергии, но противоположно по знаку

$$\left(\frac{\Delta Q_э}{\Delta E}\right) = -1.$$

Или в дифференциальной форме для $T = \text{const}$:

$$dQ_э = TdS = T \cdot n \cdot R \cdot \frac{dV}{V}; \; dE = -pdV;$$

$$\frac{dQ_э}{dE} = -\frac{T \cdot n \cdot R \cdot dV}{V \cdot p \cdot dV} = -\frac{T \cdot n \cdot R \cdot VdV}{V \cdot T \cdot n \cdot R \cdot dV} = -1.$$

Рассмотрев основные понятия неклассической физики, перейдём к изучению современных неклассических представлений о строении вещества.

§ 1.2.1. Строение вещества

Согласно классическим представлениям все вещества состоят из молекул, молекулы состоят из атомов (рис. 1.21), атомы состоят из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг ядра отрицательно заряженных электронов (рис. 1.22)

Рис. 1.21. Модель строения молекулы водорода ***(H_2)***

Рис. 1.22 . Модели строения атома водорода ***(H)*** *и атома гелия****(He)***

§ 1.2.2. Фермионы

Ядро атома любого элемента периодической системы представляет собой совокупность положительных протонов и нейтральных нейтронов (нуклонов), за исключением атома водорода, ядром которого оказывается один единственный протон (рис. 1.22).

Неклассическая физика открыла, что нуклоны также являются составными объектами, состоящими из менее массивных частиц. А, вот,

отрицательно заряженный электрон является фундаментальной (неделимой) частицей, представляющей собой один из лептонов (табл. 1.1) – фундаментальных частиц, не участвующих в сильном взаимодействии между нуклонами и между составными их частями.

Таблица 1.1

Свойства лептонов

№ п/п	Название	Условное обозначение	Заряд в единицах заряда протона	Масса в единицах, а.е.м.	Спин в единицах ħ	Примечание
1	Электрон	e^-	–1	$5{,}5\cdot10^{-4}$	± 1/2	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$, где h –постоянная Планка ($h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ Дж/Гц) из уравнения $E = h\cdot\nu$, E – энергия фотона, ν – частота его колебаний
2	Электронное нейтрино	ν_e	0	$< 2{,}1\cdot10^{-9}$	± 1/2	
3	Мюон	μ^-	–1	$1{,}1\cdot10^{-}$	± 1/2	
4	Мюонное нейтрино	ν_μ	0	$2{,}0\cdot10^{-4}$	± 1/2	
5	Тау-лептон	τ^-	–1	$1{,}9\cdot10^{0}$	± 1/2	
6	Тау-нейтрино	ν_τ	0	$< 2{,}0\cdot10^{-2}$	± 1/2	

Причём, для каждого лептона, есть соответствующий антилептон. Например, античастицей электрона является позитрон (e^+), античастицей электронного нейтрино, электронное антинейтрино (ν_e) и так далее.

Протоны и нейтроны состоят из **кварков** – фундаментальных (неделимых) частиц, которые «склеиваются» невещественными неделимыми (фундаментальными) глюонами (рис. 1.23).

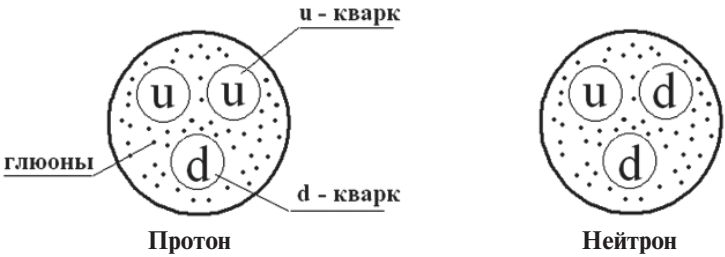


Рис. 1.23. Глюонно-кварковое строение протона и нейтрона

В настоящее время открыты 6 сортов (ароматов) кварков (табл. 1.2), образующих вместе с глюонами различные элементарные частицы.

Таблица 1.2

Свойства кварков

№ п/п	Условное обозначение	Этимология	Перевод	Заряд в единицах заряда протона	Масса в единицах, а.е.м.	Спин в единицах ħ
1	*U*	up	верхний	+2/3	$2{,}5\cdot10^{-3}$	±1/2
2	*d*	down	нижний	–1/3	$5{,}2\cdot10^{-3}$	±1/2
3	*S*	strange	странный	–1/3	$1{,}0\cdot10^{-1}$	±1/2
4	*C*	charmed	очарованный	+2/3	$1{,}4\cdot10^{0}$	±1/2
5	*b*	beauty	прелестный	–1/3	$4{,}5\cdot10^{0}$	±1/2
6	*t*	truth	истинный	+2/3	$1{,}9\cdot10^{2}$	±1/2

Каждому кварку соответствует антикварк. Поскольку и лептоны и кварки обладают одинаковым спином ($s = \pm 1/2\hbar$), то они были объединены в общий класс частиц, который называют «ФЕРМИОНЫ».

§ 1.2.3. Спин

Как видно из табл. 1, размерность спина (s) Дж/Гц. На самом деле эта размерность совпадает с размерностью момента импульса (L) вращающегося тела:

$$[L] = [mvr],$$

где m – масса вращающегося тела; v – линейная скорость этого тела; r – радиус вращения. Действительно

$$[mvr] = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$[s] = \text{Дж}/\text{Гц} = \text{Дж}\cdot\text{с} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}}{\text{с}^2} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}^2}{\text{с}} = [mvr] = [L].$$

В то же время было установлено, что спин является внутренней характеристикой фундаментальных частиц, не связанной с их перемещением в пространстве. Поэтому спин определяют как ***собственный момент импульса фундаментальной частицы***, первоначально трактуемый как характеристика её вращения вокруг собственной оси. Поскольку значение спина может приобретать противоположные знаки, то считалось, что частица способна вращаться в противоположных направлениях. Однако, вскоре

выяснилось, что при величине спина ±1/2ħ электрон должен вращаться вокруг своей оси со скоростью, большей скорости света, что противоречило общей теории относительности.

В настоящее время разрабатываются теории струн для фундаментальных частиц со спином ±1ħ, 0ħ и суперструн для любых фундаментальных частиц. Согласно этим теориям каждая фундаментальная частица представляет собой короткую струну длиной порядка 10^{-35} м, колеблющуюся в многомерном пространстве (размерность пространства 26 в теории струн и 10 в теории суперструн). Причём струна может быть как открытой, так и замкнутой. В этом случае спин оказывается одной из энергетических характеристик колебания этой струны.

Но следует подчеркнуть, что экспериментального подтверждения теории струн и суперструн, пока, не получили.

Таким образом, хотя до настоящего времени природа спина однозначно не установлена, ему можно дать следующее определение: ***спин — это собственный момент импульса фундаментальной частицы, характеризующий её внутреннее вращательное или колебательное движение.***

§ 1.2.4. Бозоны

Помимо рассмотренных выше фермионов (кварков и лептонов), обладающих спином ±1/2ħ, были открыты частицы, обладающие целым значением спина (0ħ; ±1ħ; ±2ħ; ±3ħ...). Такие частицы называют ***бозонами***.

К фундаментальным бозонам относятся: фотон, глюон, W-бозон (weak), Z-бозон (zero), бозон Хиггса (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Свойства фундаментальных бозонов

№ п/п	Название	Заряд в единицах заряда протона	Масса в единицах, а.е.м.	Спин в единицах ħ	Переносимое взаимодействие	Время жизни в секундах
1	Фотон	0	0	±1	Электромагнитное	До поглощения
2	Глюон	0	0	±1	Сильное	До поглощения
3	W-бозон	±1	58,0	±1	Слабое (Weak)	$3{,}0 \cdot 10^{-25}$
4	Z-бозон	0 (Zero)	65,8	±1	Слабое	$3{,}0 \cdot 10^{-25}$
5	Бозон Хиггса	0	90,2	0	Поле Хиггса	$1{,}6 \cdot 10^{-22}$

Теория струн разрабатывается именно для фундаментальных бозонов. Теория суперструн – для всех фундаментальных частиц.

Таким образом, согласно современным научным представлениям ***весь материальный мир состоит из 12 фермионов (6 кварков и 6 лептонов) и 5 бозонов, непрерывно движущихся в пространстве и времени*** (рис. 1.24).

Рис. 1.24. Простейшая классификация фундаментальных частиц

При этом, фундаментальные бозоны являются носителями взаимодействий.

Например, электромагнитное взаимодействие между двумя покоящимися, одноимённо заряженными частицами, приводящее к их отталкиванию, обусловлено обменом фотонами между этими частицами (рис. 1.25).

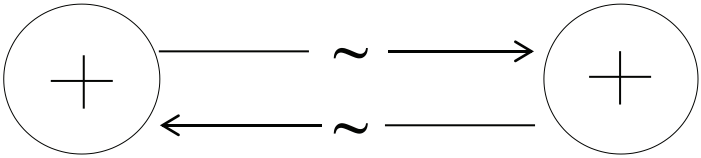


Рис. 1.25. Обмен фотонами между одноимённо заряженными частицами

Обмен фотонами между разноимённо заряженными частицами представлен на рис. 1.26.

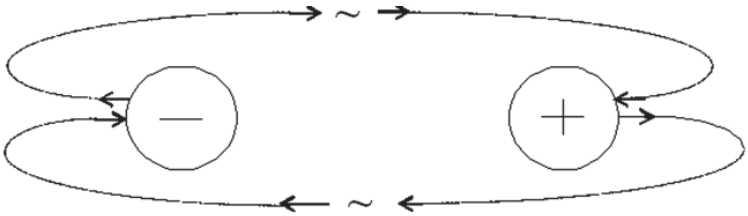


Рис. 1.26. Обмен фотонами разноимённых зарядов

При этом линии, символизирующие движение фотонов на рис. 2, 3, на самом деле условны и не являются траекториями их движения, потому что эти фотоны движутся в соответствии с принципом неопределённости Гейзенберга, согласно которому *невозможно одновременно точно определить координаты* (x) и импульс ($p = m \cdot v$) *одной и той же частицы. Точное определение одной из величин приводит к полной неопределённости значения другой:*

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2.$$

Следует уточнить, что фермионами и бозонами могут быть не только фундаментальные, но и составные элементарные частицы. Например, протон также является фермионом, потому что состоит из трёх кварков, два из которых обладают противоположными спинами.

Нулевое значение массы для фотона и глюона означает, что эти частицы не бывают в состоянии покоя. Они имеют волновую природу (рис. 1.5; 1.7) и могут существовать только в движении, полёте со скоростью света.

При этом они обладают энергией E, подчиняющейся равенству

$$E = h \cdot \nu,$$

где h – постоянная Планка ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц); ν – частота волновых колебаний, связанная с длиной волны λ соотношением

$$\lambda \cdot \nu = c,$$

где c – скорость света.

Но согласно одной из формул теории относительности А. Эйнштейна

$$E = m \cdot c^2,$$

где m – масса. Поэтому, для фотона и глюона можно рассчитать массу по формуле

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Масса, рассчитанная по такой формуле для фотона и глюона, называется ***релятивистской массой***. То есть, эти частицы, хотя и считаются безмассовыми, но обладают релятивистской массой.

Со временем выяснилось, что не только безмассовые частицы подчиняются равенству $E = h \cdot \nu$, но и любые элементарные частицы, обладающие импульсом. То есть, в процессе движения элементарные частицы (корпускулы) приобретают волновые свойства. Таким образом, был сформулирован принцип корпускулярно-волнового дуализма, согласно

которому *любая частица обладает одновременно и корпускулярными и волновыми свойствами*. Волны движущихся элементарных частиц назвали *волнами де Бройля* по имени Французского физика Луи де Бройля, который впервые высказал гипотезу о том, что не только фотон, но и все элементарные частицы обладают волновыми свойствами.

В табл. 3 подразумевается, что слабое взаимодействие осуществляется с помощью W- и Z-бозонов.

Например, слабое взаимодействие (определение на стр. 8) осуществляется при распаде свободного нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино:

$$n \longrightarrow p^{+} + e^{-} + \nu_{e}^{-},$$

через образование W-бозона:

$$\underset{5,2\cdot10^{-3}}{d} \longrightarrow \underset{2,5\cdot10^{-3}}{u} + \underset{58}{W^{-}}; \qquad \underset{58}{W^{-}} \longrightarrow \underset{5,5\cdot10^{-4}}{e^{-}} + \underset{2,1\cdot10^{-9}}{\nu_{e}^{-}}.$$

На первый взгляд последние два превращения протекают с грубым нарушением законов сохранения масс и энергии ($m(d) = 5,2\cdot10^{-3}$ а.е.м.; $m(u) = 2,5\cdot10^{-3}$ а.е.м.; $m(W) = 58$ а.е.м.; $m(e^{-}) = 5,5\cdot10^{-4}$ а.е.м.; $m(\nu_e) = 2,1\cdot10^{-9}$ а.е.м.).

Однако, согласно теориям струн и суперструн, для образования W-бозона берётся на очень короткое время ($3\cdot10^{-25}$ с) энергия из дополнительных пространственных измерений, после чего эта энергия возвращается назад. Теория струн предполагает общее число измерений на уровне фундаментальных частиц 28, теория суперструн – 10. Законы сохранения массы и энергии не нарушаются, хотя в пределах непосредственно наблюдаемого 3-мерного пространства подобные процессы воспринимаются как кратковременное нарушение этих законов.

Очень коротко живущие элементарные частицы, моментально поглощаемые после испускания другими частицами или превращающиеся в другие частицы, называются, в отличие от реальных частиц, ***виртуальными***, именно из-за:

– способности не подчиняться законам сохранения в пределах 3-мерного пространства;

– движения в 3-мерном пространстве в соответствии с принципом неопределённости Гейзенберга.

Некоторые частицы в разных условиях могут быть и реальными и виртуальными. Например, фотон испускаемый Солнцем и летящий к Земле, является реальной частицей, подчиняющейся всем классическим законам физики и механики, а фотон, испускаемый зарядом, взаимодействующим с другим зарядом, является виртуальным.

Взаимодействие, которое в табл. 3 названо «поле Хиггса» – это взаимодействие между частицами, имеющими массу, и бозоном Хиггса.

Принято считать, что:

– электромагнитное взаимодействие (определение на стр. 8) осуществляется посредством электромагнитного поля (определение на стр. 12);

– сильное взаимодействие (определение на стр. 8) осуществляется посредством глюонного поля, представляющего собой свойство пространства объединять кварки в нуклоны, а нуклоны в ядра атомов;

– слабое взаимодействие (определение на стр. 8) осуществляется посредством поля W- и Z-бозонов, представляющего собой свойство пространства инициировать распад элементарных частиц.

Свойство пространства придавать фундаментальным частицам инертную массу называется полем Хиггса.

Именно инертную! Потому что масса может быть *инертной* и *гравитационной*.

§ 1.2.5. Инертные и гравитационные свойства массы

С одной стороны масса, действительно, является мерой инертности, рассчитываемой, согласно второму закону Ньютона, по формуле

$$m_{и} = \frac{F}{a},$$

где a – ускорение, сообщаемое инертной массе $m_{и}$ силой F.

С другой стороны масса этого же тела оказывается мерой способности притягивать другое тело с массой M (пробную массу). В этом случае масса рассчитывается в соответствии с формулой Закона всемирного тяготения:

$$m_{г} = \frac{F \cdot R^2}{\gamma \cdot M},$$

где $m_{г}$ – гравитационная масса тела; γ – гравитационная постоянная ($\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ (Н·м^2)/кг^2); R – расстояние между центрами масс M и $m_{г}$.

Таким образом, ***инертная масса – это мера инертности тела, гравитационная масса – это мера способности притягивать другое тело.*** При этом, многократными и точнейшими экспериментами доказано, что всегда инертная масса равна гравитационной:

$$m_{и} = m_{г}.$$

Хотя научного объяснения этому равенству до сих пор нет, теоретики возвели его в принцип, который называют «***принцип эквивалентности***».

§ 1.2.6. Фундаментальные взаимодействия

Указанные в табл. 3 взаимодействия вместе с гравитационным называют ***фундаментальными*** потому что абсолютно любые взаимодействия в природе сводятся к этим пяти.

Каждое из пяти взаимодействий, приведённых на стр. 8. (рис. 1.1.) формируется своим физическим полем. Каждое поле, согласно табл. 3, формируется переносчиками взаимодействия – фундаментальными бозонами, которые называются квантами. Поэтому соответствующая теория получила название «Квантовая теория поля».

Гравитационное взаимодействие (определение на стр. 8) , формируемое гравитационным полем (определение на стр. 9), в табл. 3 отсутствует, хотя свойства этого взаимодействия изучены достаточно давно и подробно. Но частицы, отвечающей за гравитационное взаимодействие, до сих пор не обнаружено, хотя теоретики достаточно подробно описывают свойства, которыми она должна обладать и даже дали ей название «гравитон». В частности, гравитон должен иметь спин равный 2. Но поскольку экспериментального доказательства существования кванта гравитационного поля – гравитона – до сих пор получить не удалось, то наиболее признанной теорией, объясняющей свойства гравитационного поля, остаётся общая теория относительности, согласно которой гравитационное поле является результатом кривизны пространственно-временного континуума (более подробно в § 1.10.), а не обмена взаимодействующих тел гравитонами. Концепция кривизны пространственно-временного континуума, также как представления об объектно-пространственном взаимодействии (рис. 1.19, стр. 48), выходит за рамки квантовой теории поля. Попытки создать объединяющую теорию, в которой квантовая теория поля и общая теория относительности представляли бы собой два аспекта единого учения, пока, не увенчались успехом.

Таким образом, гравитационное поле остаётся для современной науки наиболее загадочным физическим полем.

Примеры решения задач

Задача 1

5. Во сколько раз самый массивный лептон тяжелее электрона?

Дано:	*Решение*
$m_e = 5{,}5\cdot10^{-4}$ а.е.м. $m_\tau = 1{,}9$ а.е.м.	$N = \dfrac{m_\tau}{m_e}.$
N – ?	

Вычисление

$$N = \frac{1,9}{5,5 \cdot 10^{-4}} = \frac{19}{55} \cdot 10^4 = 0,3(45) \cdot 10^4 = 3,(45) \cdot 10^3.$$

Ответ: $N = 3,(45) \cdot 10^3$.

Задача 2

Доказать, что инертная и гравитационная массы тела равны, если приложенная к этому телу сила 70 Н сообщает ему ускорение 1 м/с^2. Сила притяжения этого тела к Земле у поверхности Земли равна отношению $\frac{28014}{40,589641}$ Н. Масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг, радиус Земли 6 371 км, гравитационная постоянная равна $6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2.

Дано:	*Решение*
$F_1 = 70$ Н $a = 1$ м/с^2 $F_2 = 686$ Н $M = 6 \cdot 10^{24}$ кг $R = 6,371 \cdot 10^6$ м $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2	Согласно второму закону Ньютона $m_и = \frac{F_1}{a}$. Согласно Закону всемирного тяготения $m_г = \frac{F_2 \cdot R^2}{\gamma \cdot M}$.
$m_и$ – ? $m_г$ – ?	

Вычисление

$$m_и = \frac{70}{1} = 70 \text{ (кг)};$$

$$m_г = \frac{28014 \cdot \left(6,371 \cdot 10^6\right)^2}{40,589641 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}} = 70 \text{ (кг)}.$$

Ответ: $m_и = m_г = 70$ кг.

Задачи для самостоятельного решения

1. Рассчитать релятивистскую массу фотона, частота колебаний которого, составляет $5 \cdot 10^{14}$ Гц.

2. Проверить справедливость принципа эквивалентности для камня, находящегося на Лунной поверхности, если при воздействии на него

силы 5 Н, он испытывает ускорение 10 м/с^2. Сила притяжения этого камня к Луне равна отношению $\frac{2451225}{3020644}$ Н. Масса Луны 7,35·10^{22} кг. Диаметр Луны 3476 км. Гравитационная постоянная равна 6,67·10^{-11} Н·м^2/кг^2.

3. Пользуясь табл. 2, и полагая, что 1 а.е.м. ≡ 1,66·10^{-27} кг, оценить энергию глюонов в протоне.

4. Вычислить и представить в системе СИ массу очарованного b-мезона, состоящего из c-кварка и b-антикварка, если глюоны этой частицы обладают совокупной энергией 1,2·10^{-10} Дж.

5. Вычислить и представить в системе СИ массу пиона π^+, состоящего из u-кварка и d-антикварка, если глюоны этой частицы обладают совокупной энергией 3,195·10^{-12} Дж.

6. Оценить – во сколько раз время жизни бозона Хиггса превышает время жизни W-бозонов и Z-бозонов.

7. Пользуясь принципом неопределённости Гейзенберга, рассчитать ошибку определения импульса (Δp_x; Δp_y; Δp_z) элементарной частицы, если ошибка определения её координаты (Δx; Δy; Δz) составила

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2{,}64\pi \cdot 10^{-36} \text{ м}.$$

1. Перечислите известные вам кварки и укажите значения их зарядов и спин. Какие из перечисленных кварков участвуют в образовании протона и нейтрона?

2. Перечислите известные вам лептоны и укажите значения их зарядов и спин. Какой из лептононов входит в состав атомов?

3. Перечислите известные вам бозоны и укажите значения их зарядов и спин. Какое взаимодействие обеспечивает каждый из них?

§ 1.2.7. Элементы теории относительности

Особенностью теории относительности, разработанной Альбертом Эйнштейном, является подход к рассмотрению пространства и времени как к единой четырёхмерной протяжённости[15], включающей в себя помимо длины, ширины, высоты, четвёртую размерность – фактор времени ct, где c – скорость света ($c \approx 300\,000$ км/с), t – время. То есть, время рассматривается в качестве количественной характеристики расстояния, преодолеваемого светом (фотонами).

[15] Иногда такую протяжённость называют четырёхмерным *континуумом*.

Теория относительности включает в себя два основных раздела, использующих этот общий для них подход:

– специальная теория относительности (СТО);

– общая теория относительности (ОТО).

СТО рассматривает инерциальные системы, т. е. покоящиеся или движущиеся друг относительно друга равномерно, без ускорения. ОТО рассматривает неинерциальные системы, т. е. движущиеся с ускорением $\overline{a}$ относительно друг друга, в том числе, под действием сил гравитационного поля. При этом, СТО оказывается частным случаем ОТО, при котором $a = 0$ м/с^2.

§ 1.2.8. Специальная теория относительности

Для СТО А. Эйнштейн сформулировал два постулата:

1. *Все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта.*

2. *Скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчёта. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приёмника светового сигнала.*

Кроме того, были разделены понятия «время» и «интервал времени». Поэтому и мы, в рамках СТО под временем t будем подразумевать показания синхронизированных часов в конкретный момент, а интервал времени Δt, пусть, означает расстояние, преодолеваемое концом минутной (часовой, секундной) стрелки, измеряемое в минутах (часах, секундах). Например, взглянув на различные часы с одинаковыми положениями стрелок (синхронизированные), мы фиксируем время. А, заметив расстояние, которое пройдёт свободный конец минутной стрелки в течение 10 минут, мы фиксируем интервал времени, равный 10 минут ($\Delta t = 10$ минут).

Опираясь на приведённые постулаты и математические преобразования координат в движущихся системах отсчёта, разработанные Х.А. Лоренцем, А. Эйнштейн пришёл к выводу о несовпадении течения времени в движущемся и покоящемся объектах (системах отсчёта). Например, если космический корабль (S) движется относительно неподвижной космической станции (S_0) со скоростью v, то:

$$t = \frac{t_0 - \left(vx_0 / c^2 \right)}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}, \qquad (1.15)$$

где t_0 – время, фиксируемое наблюдателем в неподвижной станции по своим часам (часам станции S_0); t – время, фиксируемое тем же

наблюдателем по синхронизированным часам космического корабля S; x_0 – расстояния между станцией и кораблём, наблюдаемой со станции; c – скорость света. Как видно из уравнения, соотношение между t_0 и t в рассматриваемых объектах зависит не только от скорости их движения v относительно друг друга, но и от расстояния между ними. Причём, соотношение между расстоянием x_0 и этим же расстоянием, но наблюдаемым из движущегося объекта (x), выглядит следующим образом:

$$x = \frac{x_0 - vt_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \qquad (1.16)$$

Если в уравнении (1.15) расстояние x_0 представить тождеством $x_0 = v \cdot t_0$, то можно получить равенство:

$$\Delta t = \Delta t_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}, \qquad (1.17)$$

где Δt_0 – интервал времени, наблюдаемый неподвижным наблюдателем по часам неподвижной системы; Δt – тем же наблюдателем по часам движущейся системы. Из 27.3 следует, что неподвижный наблюдатель увидит замедление течения времени в движущемся объекте.

Подставив в уравнение (1.15) значение x_0 из выражения (1.16) получим, что при $t_0 = 0$ (в полночь на космической станции) часы на удаляющемся от станции космическом корабле будут восприниматься наблюдателем космической станции как отстающие:

$$t = -\frac{v \cdot x}{c^2}.$$

То есть, отставание часов на космическом корабле будет наблюдаться не только из-за медленного в нём течения времени, но также из-за удаленности космического корабля от станции. Более того, часы синхронизированные и расположенные в противоположных концах космического корабля будут восприниматься наблюдателем с неподвижной станции как рассинхронизированные, т. е., показывающие разное время, поскольку будут находиться на разном расстоянии от наблюдателя. Такое явление получило название «Относительность одновременности». Действительно, для членов экипажа удаляющегося космического корабля все их синхронизированные часы показывают одно и то же время одновременно, а для наблюдателей из космической станции – чем дальше часы по направлению движения, тем сильнее они отстают от часов станции. Причём, если космический корабль приближается к станции,

то наблюдатель станции будет воспринимать часы космического корабля спешащими вперёд (рис. 1.27)

$$t = \frac{v \cdot x}{c^2}.$$

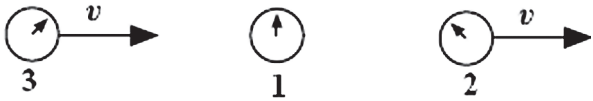


Рис. 1.27. Схема отклонения синхронизированных часов:
1 – стрелка часов неподвижной космической станции;
2 – стрелка часов космического корабля, удаляющегося от станции;
3 – стрелка часов космического корабля, приближающегося к космической станции

Важной частью СТО стал также вывод об уменьшении размеров тел вдоль направления их движения:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \qquad (1.18)$$

где l_0 – длина неподвижного тела; l – длина этого же тела, движущегося со скоростью v, относительно неподвижного наблюдателя в направлении измеряемой длины.

Интересно отметить, что последнее уравнение математически совпадает с уравнением (1.17), хотя физический смысл его совсем иной.

Помимо сказанного, А. Эйнштейн сформулировал закон сложения скоростей, близких к скорости света, согласно которому:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2},$$

где v_1 – скорость движения объекта относительно неподвижного наблюдателя (например, скорость космического корабля относительно космической станции) (рис. 1.28); v_2 – скорость движения другого объекта (например, другого космического корабля) относительно того же наблюдателя; v – скорость движения этих объектов относительно друг друга.

Если $v_1 << c$ и $v_2 << c$, то $v = v_1 + v_2$. **То есть, закон сложения скоростей, применяемый в механике Ньютона, оказывается частным случаем более общего закона сложения скоростей специальной теории относительности. Уравнение сложения скоростей специальной теории относительности превращается в уравнение сложения скоростей механики Ньютона при скоростях намного меньше скорости света.** Причём этот вывод оказался справедливым

по отношению ко многим уравнениям СТО. Действительно, при $v << c$ уравнение (1.18) превращается в равенство $l = l_0$, уравнение (1.17) в тождество $\Delta t = \Delta t_0$, уравнение (1.15) в равенство $t = t_0$.

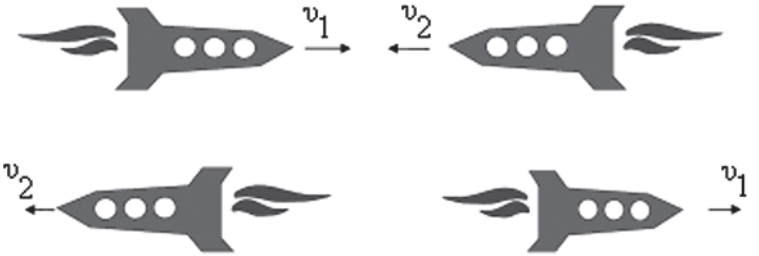


Рис. 1.28. Иллюстрация закона сложения скоростей объектов, движущихся в противоположных направлениях

В рамках СТО А. Эйнштейн вывел также уравнение, устанавливающие зависимость между массой (m) и энергией (E), заключённой в ней:

$$E = mc^2.$$

И, всё-таки, наиболее парадоксальным выводом СТО до сих пор считается относительность времени, описываемая уравнением (27.3).

При этом, поскольку время оказалось относительным, то все события в рамках рассматриваемой теории рассматриваются не относительно времени, а относительно инвариантного интервала s, определяемого по формулам:

$$s = \sqrt{(ct)^2 - (v \cdot t)^2} = \sqrt{(ct)^2 - \left(v_x \cdot t\right)^2 - \left(v_y \cdot t\right)^2 - \left(v_z \cdot t\right)^2},$$

где v_x, v_y, v_z – проекции скорости v на координатные оси x, y, z. Соответственно:

$$s^2 = (ct)^2 - (v \cdot t)^2 = (ct)^2 - \left(v_x \cdot t\right)^2 - \left(v_y \cdot t\right)^2 - \left(v_z \cdot t\right)^2. \qquad (1.19)$$

Таким образом, все события в СТО измеряются относительно параметра, представляющего собой функцию трёх пространственных координат и времени. То есть, пространство и время рассматриваются как аспекты единого четырёхмерного пространства (континуума), в котором величина ct является четвёртой координатой.

В привычном для нас трёхмерном пространстве Эвклида квадрат длины интервала, преодолеваемого любым объектом, представляет собой

сумму квадратов проекций этой длины на координатные оси (сумму квадратов координат):

$$s^2 = (v \cdot t)^2 = \left(v_x \cdot t\right)^2 + \left(v_y \cdot t\right)^2 + \left(v_z \cdot t\right)^2 .$$

Аналогично рассчитывается квадрат длины для четырёх и более мерного пространства Эвклида – как сумма квадратов всех координат:

$$s^2 = (v \cdot t)^2 = \left(v_x \cdot t\right)^2 + \left(v_y \cdot t\right)^2 + \left(v_z \cdot t\right)^2 + \left(v_\varepsilon \cdot t\right)^2 + ... + \left(v_n \cdot t\right)^2 .$$

Однако, в СТО, квадрат длины четырёхмерного пространственно-временного континуума представляет собой разницу между квадратом координаты *ct* и квадратом трёх оставшихся пространственных координатам (уравнение (1.19)). Такое пространство, в отличие от пространства Эвклида, принято называть пространством Минковского. Но поскольку многие сложные уравнения четырёхмерного пространственно-временного континуума могут преобразовываться в привычные уравнения трёхмерного Эвклидова пространства, то в дальнейшем мы будем рассматривать именно последние.

Общепризнанная теория СТО, на самом деле привела к парадоксу, получившему название «Парадокс близнецов». Суть его состоит в том, что течение времени в движущемся объекте должно замедляться и все события, протекающие на нём, восприниматься, как в замедленном фрагменте фильма. Получается, что человек, оставшийся на Земле, может встретить через много лет своего брата-близнеца, летавшего на космическом корабле с около световыми скоростями, значительно моложе себя. Потому что время в таком космическом корабле текло медленнее. Однако, с около световой скоростью летит не только космический корабль относительно Земли, но и наоборот – Земля относительно космического корабля также движется с той же скоростью! А это значит, что космонавт должен воспринимать процессы, протекающие на Земле... подобно замедленному фрагменту фильма точно также как и наблюдатель с Земли, который будет видеть события на космическом корабле замедленными! Тогда кто же из близнецов окажется младше – оставшийся на Земле или вернувшийся из космического путешествия? Окончательное разрешение этот парадокс получил уже в рамках общей теории относительности.

§ 1.2.9. Общая теория относительности

Согласно ОТО течение времени замедляется во всех неинерциальных системах, т.е. движущихся с ускорением или находящихся в гравитационном поле.

Например, в гравитационном поле:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 + \frac{\varphi - \varphi_0}{c^2}\right),$$

где τ – интервал времени, наблюдаемый в гравитационном поле с Ньютоновским гравитационным потенциалом φ ($\varphi_0 = -\gamma \frac{m_0}{r}$ см. § 7); τ_0 – интервал времени, наблюдаемый в гравитационном поле с Ньютоновским гравитационным потенциалом φ_0 $\left(\varphi_0 = -\gamma \frac{m_0}{r}\right)$.

А в космическом корабле, движущемся равноускоренно или равнозамедленно, с абсолютным значением собственного ускорения, равным a:

$$\tau = \frac{c}{a} \ln\left[\frac{a \cdot \tau_0}{c} + \sqrt{1 + \left(\frac{a \cdot \tau_0}{c}\right)^2}\right],$$

где τ_0 – интервал времени ускорения, измеренный в неподвижной системе отсчёта; τ – интервал времени ускорения, измеренный в космическом корабле.

При этом следует подчеркнуть, что если равномерное движение инерциальных систем является ***относительным*** – т. е. после перемещения наблюдателя из покоящейся системы в движущуюся, последняя становится покоящейся, а покоящаяся воспринимается как движущаяся – то ускоренное или замедленное движение ***абсолютно***! Это значит, что даже после перемещения наблюдателя из покоящейся системы в неинерциальную, движущуюся с ускорением (замедлением), последняя всё равно останется движущейся с ускорением (замедлением). Принципиальным отличием ускоряющихся (замедляющихся) систем является наличие воздействующей на них силы – система не может ускоряться или замедляться без воздействия внешней силы. Если неподвижный наблюдатель будет видеть замедление времени в такой неинерциальной системе, то наблюдатель из этой неинерциальной системы будет воспринимать ускорение времени у неподвижной системы. Анализ последнего уравнения показывает, что действительно $\tau < \tau_0$. Следовательно космический путешественник, летящий на сперва ускоряющемся, а потом замедляющемся звездолёте вернётся на землю более молодым, чем состарившийся на Земле его брат-близнец.

Согласно ОТО, за время разгона космический корабль приобретает скорость v, опреде*ляемую по уравнению:*

$$v = \frac{a \cdot \tau_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{a \cdot \tau_0}{c}\right)^2}} \tag{1.20}$$

и преодолевает расстояние x, рассчитываемое по формуле:

$$x = \frac{c^2}{a}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{a \cdot \tau_0}{c}\right)^2} - 1\right].$$

На участках равномерного полёта в течение времени τ', когда космический корабль опять становится инерциальной системой, замедление времени описывается уравнениями СТО. При этом, если полагать, что до этого звездолёт ускорялся с постоянным ускорением (a) в течение времени τ_0, то после подстановки уравнения (1.20) в равенство (1.15) получим выражение:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 + \left(\frac{a \cdot \tau_0}{c}\right)^2}}. \tag{1.21}$$

Таким образом, космический путешественник вернётся домой более молодым, чем его брат-близнец, оставшийся на Земле, однако, не потому, что летал с очень большими, около световыми скоростями, а из-за ускорений, необходимых для достижения таких скоростей и замедлений, неизбежных при посадках на других планетах и возвращении на Землю.

Кроме того, согласно **ОТО** гравитационные взаимодействия масс, вызывающие их ускоренное движение по отношению друг к другу суть проявление искривления четырёхмерного пространства Минковского.

Фотон в таком пространстве постоянно меняет своё направление по отношению к направлению первоначальному. Чем больше масса, тем сильнее возле неё пространственная кривизна, воспринимаемая нами как тяготение. Например, луч света далёкой звезды, проходя рядом с солнцем – самым мощным источником гравитационного поля солнечной системы – отклоняется от своего направления на угол, достаточно значительный, чтобы быть измеренным земными наблюдателями (рис. 1.29).

Кроме того, искривление пространства вблизи Солнца приводит к заметной прецессии траектории вращения Меркурия (рис. 1.30) вокруг нашей звезды (отклонению от первоначальной окружности).

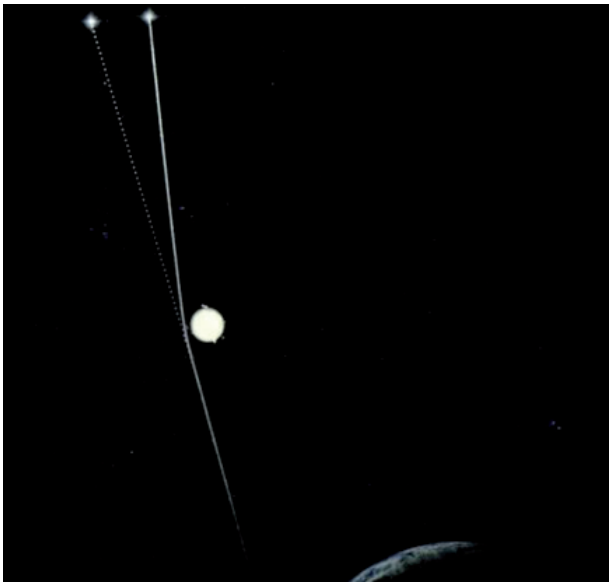


Рис. 1.29. Отклонение направления от прямой луча звезды, проходящего возле Солнца

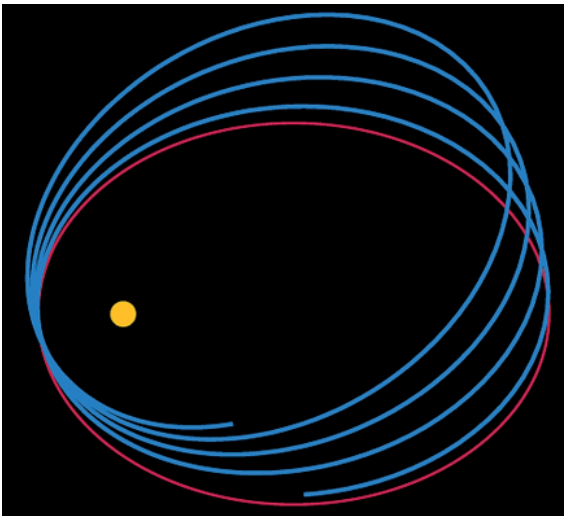


Рис. 1.30. Орбита по Ньютону (красная)
и по Эйнштейну (синие) Меркурия, вращающегося вокруг Солнца

Искривлённый четырёхмерный пространственно-временной континуум называется пространством Римана.

То есть, А. Эйнштейн показал, что свойства гравитационного поля являются свойствами *кривизны* пространственно-временного континуума. Им было теоретически предсказано, а, затем другими исследователями экспериментально подтверждено, что:

1. Пространство обладает определённой геометрической структурой (в данном случае кривизной)

2. Свойства гравитационного поля являются результатом структурирования (искривления) пространства массой.

Именно факт взаимодействия массы и пространства позволил утверждать возможность существования объект-пространственного взаимодействия (рис. 1.19, стр. 48).

При этом уравнения ОТО переходили в уравнения СТО если пространственно-временной континуум рассматривался как линейная протяжённость. **СТО оказалась частным случаем ОТО, реализуемым при искривлённости равной нулю.**

В этой ситуации естественно было предположить, что свойства электрического и магнитного полей также являются результатом какого-то структурирования пространства, возможно, более сложного. Нахождение строгого доказательства этого предположения А. Эйнштейн считал ближайшей программой минимум для современной ему физики. Однако, не было предела научной дерзости Великого учёного. Создатель специальной и общей теории относительности мечтал также открыть законы, которые объясняли бы все свойства всех элементарных *частиц* геометрическими свойствами пространства. Эту задачу он считал программой максимум. Теория, которая позволяла бы решить программу минимум и программу максимум, будучи даже не созданной, получила название «ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ (ЕТП)». При этом, ОТО стала бы частным случаем, фрагментом ЕТП. Ещё при жизни выдающегося физика, после открытия ядерных взаимодействий (сильных и слабых), создание теории единого поля было существенно осложнено, поскольку новые взаимодействия также следовало объяснять в рамках разрабатываемой теории. Открытие запутанных частиц, взаимодействующих мгновенно, выявило границы применимости постулата ОТО об ограниченности скорости любого взаимодействия скоростью света, так как для запутанных частиц этот постулат оказался неприменим. Свойства запутанных частиц объясненяются только в рамках квантовой теории поля, упомянутой в § 1.2.6 и объясняющей свойства гравитационного поля взаимным обменом гипотетическим гравитонами между элементарными частицами. Удастся

ли когда-нибудь объеденить общую теорию относительности и квантовую теорию поля? Это предстоит решать будущим поколения исследователей. Возможно, что именно Вам!

Задачи для самостоятельного решения

1. С какой скоростью относительно друг друга движутся два фотона, летящие в противоположных направлениях?

2. С какой скоростью в противоположных направлениях движутся два объекта относительно друг друга если скорость одного из них равна c, а другого c/n, где $n \geq 1$?

3. Скорость течения реки относительно неподвижного острова составляет v, м/с. Определить скорость движения фотона, летящего в направлении течения реки, относительно самой реки и относительно острова.

4. Космический корабль пролетает мимо неподвижной орбитальной станции со скоростью $\sqrt{6{,}75} \cdot 10^8$ м/с. Тело командира корабля ориентировано вдоль направления полёта. Определить рост командира космического корабля относительно орбитальной станции, если для экипажа космического корабля рост командира 180 см.

5. Оценить энергию массы своего тела. Выразить её в Дж и кДж.

6. Два космических корабля летят навстречу друг другу. Абсолютное значение скорости одного из них 200 000 км/с, другого 230 000 км/с. Каково абсолютное значение скорости кораблей относительно друг друга?

7. На сколько микросекунд уходят вперёд часы за сутки на космическом корабле GP*S*-навигации (Global Positioning *S*ystem – система глобального позиционирования) по отношению к Земным часам ($\tau_1 - \tau_0 = \Delta\tau_1$) из-за меньшего гравитационного поля, и на сколько микросекунд они отстают из-за высокой скорости движения корабля ($\tau_2 - \tau_0 = \Delta\tau_2$), если он вращается вокруг Земли на высоте 20 200 км над уровнем моря с линейной скоростью 1,3 км/с. На сколько микросекунд, в конечном итоге, изменится время на космическом корабле за сутки ($\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 = \Delta\tau$)? Масса Земли $6{,}0 \cdot 10^{24}$ кг, средний радиус Земли 6 371 км, гравитационная постоянная $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2/кг^2.

8. Космический корабль летит к звёздной системе Альфа Центавра, удалённой от Земли на расстояние x в 4,3 световых года (св. года). Первую половину пути корабль разгоняется с ускорением а равным 1 св. год/год^2, вторую половину пути тормозит с тем же ускорением. Скорость света в данных единицах измерения 1 св. год/год. Равномерного полёта с постоянной скоростью нет ($\tau' = 0$). Затем корабль разворачивается и повторяет этапы разгона и торможения. Рассчитать:

– время, которое в течение этого полёта пройдёт на Земле (τ_0);

– время, которое в течение этого полёта пройдёт на космическом корабле (t);

– максимальную скорость, которую достигнет космический корабль (v);

– значение ускорения космического корабля в системе СИ.

9. Рассчитать те же параметры, для того же космического корабля, двигающегося в том же режиме, но по направлению к Галактике Андромеды, удалённой от Земли на 2,5 миллиона световых лет.

10. Космический корабль отделился от неподвижной космической станции и удаляется от неё, набрав скорость 36 000 км/с. Определить разницу в показаниях синхронизированных на корабле часов, наблюдаемых с космической станции и находящихся друг от друга относительно неподвижного наблюдателя на расстоянии 500 м по направлению движения корабля.

---

1. В чём состоит особенность подхода А. Эйнштейна к рассмотрению пространства и времени? Каковы постулаты его специальной теории относительности?

2. Какую связь устанавливает общая теория относительности между гравитационным полем и геометрическими свойствами пространства?

Заключение главы 1

В заключение раздела «Физика» следует отметить, что в наши дни неклассическая физика постепенно уступает своё место новому уровню развития человеческого познания – постнеклассической физике, которая характеризуется открытием сложных физических самоорганизующихся процессов, течение которых не является жёстко детерминированным, т.е. предсказуемым с помощью конкретных формул. В частности, таковыми оказались вихревые (турбулентные) потоки газов или жидкостей, описываемых математическими уравнениями, имеющими несколько решений. То есть, точное предсказание течения турбулентного макропроцесса оказалось невозможным в принципе! Подобные процессы получили название «Синергетические» и были также обнаружены в химических, биологических и даже социальных системах. В связи с этим в науке сформировалось междисциплинарное направление – синергетика. Более подробное изложение особенностей синергетических процессов будет изложено в следующей главе, в разделе «Неклассическая и постнеклассическая химия».

Глава 2. ХИМИЯ

2.1. Классическая химия

§ 2.1.1. Основные понятия классической химии (повторите определение химии, приведённое во введении)

Одними из основополагающих понятий классической химии являются: атом, элемент, молекула, масса, молекулярная масса, количество вещества, моль, число Авогадро, постоянная Авогадро, молярная масса, степень окисления атома, валентность, химическая связь, ковалентность, эквивалент. Хотя значения многих из этих терминов рассматривались на школьных занятиях по химии, тем не менее, приведённые ниже определения рекомендуется использовать в качестве справочного материала на протяжении изучения всего настоящего курса.

Первые два понятия – атом и элемент настолько взаимосвязаны, что даже определяются друг через друга.

Атом – это мельчайшая нейтральная частица химического элемента, состоящая из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него отрицательно заряженных электронов.

Химический элемент – это **простое вещество, состоящее из атомов с одинаковым зарядом ядра, обладающее не только химическими, но и физическими свойствами (имеются в виду: температура плавления, температура кипения, плотность, электропроводность и т. д.).**

Молекула – это мельчайшая частица вещества, обладающая всеми его химическими свойствами и состоящая из одного или нескольких атомов.

Масса (m) – это мера силы (F), воздействующей на тело для придания ему единичного ускорения (a) $\left(m = \frac{F}{a}\right)$[16]. Масса измеряется в килограммах (кг), граммах (г), миллиграммах (мг), атомных единицах массы. (1 а.е.м. ≡ $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг). Иногда измеряют относительную массу, которая представляет собой безразмерную величину, численно равную 1 а.е.м.

[16] Поскольку масса является источником гравитационного поля, то она также рассматривается в качестве меры напряжённости (E) создаваемого гравитационного поля на расстоянии r: $m = E\frac{r^2}{\gamma}$, где γ – гравитационная постоянная. Хотя обе массы эквивалентны, но первая называется инертной, а вторая гравитационной.

Молекулярная масса $(\bar{m})$ – это масса одной молекулы.

Количество вещества – это количество молекул вещества, измеряемое в молях (1 моль ≡ $6{,}022 \cdot 10^{23}$ штук). Масса одного моль вещества измеряется в единицах массы (килограммы, граммы, миллиграммы).

$6{,}02 \cdot 10^{23}$ – *число* Авогадро (N_A), равное отношению массы одного грамма к массе атома водорода $\left(N_A = \frac{m_{1г}}{m_H} \right)$;

$6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ – *постоянная* Авогадро, являющаяся коэффициентом пропорциональности между безразмерной единицей измерения количества (штуки) и молью[17];

Молярная масса (M) – это величина, численно равная массе одного моль вещества, но измеряемая в г/моль или кг/моль. Если молярная масса измеряется в г/моль, то её численное значение равно молекулярной массе измеряемой в а.е.м. Иногда молярная масса определяется как отношение данной массы вещества к количеству вещества данной массы.

Степень окисления атома – это воображаемый заряд атома в соединении, вычисленный исходя из предположения, что соединение состоит из ионов.

Валентность атома – это количество его неспаренных электронов, взаимодействующих с электронами другого атома.

Химической связью называются силы, обусловленные взаимодействием электронов *различных* атомов и объединяющие их в одну молекулу. Под количеством связей в молекуле подразумевают число электронных пар, участвующих в формировании этих сил.

Ковалентность атома (суммарная валентность) – это сумма валентности и количества связей, образованных спаренными электронами данного атома или другого атома[18].

Функциональной связью называется химическая связь молекулы, участвующая в протекании реакции.

Функциональность молекулы – это количество её функциональных связей.

---

1. Дайте определения основополагающих понятий химии.

2. Что такое функциональная связь?

---

[17] Для постоянной Авогадро справедлива и другая размерность: 6,02·1023 а.е.м./г.

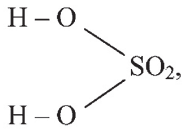
[18] В молекуле $[NH_4]Cl$ валентность азота равна трём, а ковалентность – четырём.

§ 2.1.2. Эквивалент

Эквивалент *молекулы сложного вещества* – это условная часть молекулы, являющаяся носителем одной функциональной связи или одного электрона, участвующего в окислительно-восстановительном процессе.

Эквивалентная масса $\left(\overline{m}_{Э}\right)$ – это масса одного эквивалента.

Например, если серная кислота ($\overline{m}\,(H_2SO_4)$ = 98 а.е.м.; $M\,(H_2SO_4)$ = 98 г/моль), имеющая структурную формулу:



взаимодействует с NaOH по реакции:

$$H_2SO_4 + 2NaOH = Na_2SO_4 + 2H_2O, \qquad (2.1),$$

то у неё функциональны две связи H – O. Вся молекула оказывается носительницей двух функциональных связей, а, значит, двух эквивалентов. Поэтому эквивалентом в данном случае является половина молекулы H_2SO_4. Следовательно,

$$\overline{m}_{Э}\left(H_2SO_4\right) = \overline{m}\left(H_2SO_4\right)/2 = 49 \text{ а.е.м.}$$

Молярная масса эквивалента ($M_Э$) – это масса одного моля эквивалента. В данном случае ($M_Э(H_2SO_4)$) для приведённой реакции рассчитывается по формуле:

$$M_Э\left(H_2SO_4\right) = \frac{M\left(H_2SO_4\right) \text{ г/моль}}{2 \text{ эквивалента}} =$$

$$= \frac{98}{2} \text{ г/моль} \cdot \text{экв.}\left(\text{грамм на моль – эквивалент}\right).$$

В аналогичной реакции взаимодействия NaOH с HCl молярная масса эквивалента соляной кислоты численно совпадает с молярной массой HCl:

$$HCl + NaOH = NaCl + H_2O;$$

$$M_Э(HCl) = \frac{M\,(HCl) \text{ г/моль}}{1 \text{ эквивалент}} = \frac{M\,(HCl)}{1} \text{ г/моль} \cdot \text{экв.}$$

Эквивалент *молекулы простого вещества* – это условная часть молекулы, являющаяся носителем одной валентности.

Например, молекула водорода состоит из двух атомов, каждый из которых обладает валентностью, равной единице. Поэтому, суммарная валентность молекулы этого простого вещества равна двум. Вся молекула оказывается носительницей двух валентностей, а, значит, согласно последнему определению, двух эквивалентов. Эквивалентом водорода оказывается половина молекулы. Молярная масса эквивалента (($M_Э(H_2)$) рассчитывается по формуле:

$$M_Э(H_2) = \frac{M(H_2)}{2}\left(г/моль \cdot экв.\right).$$

Следует подчеркнуть, что хотя молекула водорода, также как и молекула соляной кислоты, содержит только одну функциональную связь, однако формулы для расчёта молярных масс эквивалентов этих веществ существенно различаются, потому что одно из них является простым, а другое сложным.

В общем случае, молярные массы эквивалентов ($M_Э$) рассчитываются следующим образом.

Для простых веществ:

$$M_Э(Э_X) = \frac{M(Э_X)}{x \cdot B(Э)}\left(г/моль \cdot экв.\right) =$$

$$= \frac{x \cdot M(Э)}{x \cdot B(Э)}\left(г/моль \cdot экв.\right) = \frac{M(Э)}{B(Э)}\left(г/моль \cdot экв.\right),$$

где $M_Э(Э_X)$ – молярная масса эквивалента простого вещества, состоящего из x атомов элемента Э; $M(Э_X)$ – молярная масса этого вещества; M(Э) – молярная масса элемента; B(Э) – валентность элемента.

Для элементов (Э), входящих в состав сложного вещества:

$$M_Э(Э) = \frac{M(Э)}{B(Э)}\left(г/моль \cdot экв.\right).$$

То есть, молярные массы эквивалентов простых веществ и молярные массы эквивалентов элементов, входящих в состав сложного вещества, могут рассчитываться по одной и той же формуле.

Для кислот H_XA, где А – кислотный остаток:

$$M_Э(H_X A) = \frac{M(H_X A)}{y}\left(г/моль \cdot экв.\right),$$

где y – основность кислоты, т. е. количество ионов H^+, *принимающих участие в процессе* ($y \le x$).

Например, в реакции (2.1) основность серной кислоты равна двум. А для процесса:

$$H_2SO_4 + NaOH = NaHSO_4 + H_2O,$$

основность кислоты равна единице и не совпадает с общим количеством ионов H^+, принимающих участие в процессе.

Для оснований ($Э(OH)_X$):

$$M_Э\left(Э(OH)_X\right) = \frac{M\left(Э(OH)_X\right)}{y'}\left(г/моль \cdot экв.\right),$$

где y' – кислотность основания, т. е. количество гидроксогрупп, *принимающих участие в процессе.* ($y' \le x$).

Например, для реакции:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl = CaCl_2 + 2H_2O;$$

$$M_Э(Ca(OH)_2) = \frac{M(Ca(OH)_2)}{2}\left(г/моль \cdot экв.\right).$$

А для процесса:

$$Ca(OH)_2 + HCl = CaOHCl + H_2O;$$

$$M_Э(Ca(OH)_2) = \frac{M(Ca(OH)_2)}{1}\left(г/моль \cdot экв.\right).$$

Для солей (Me_XA_y, где Me – металл):

$$M_Э\left(Me_X A_Y\right) = \frac{M\left(Me_X A_Y\right)}{z \cdot B(Me)},$$

где *B(Me)* – валентность металла; z – количество атомов металла, принимающих участие в процессе ($z \le x$).

Для оксидов ($Э_XO_Y$):

$$M_Э\left(Э_X O_Y\right) = \frac{M\left(Э_X O_Y\right)}{z' \cdot B(Э)}\left(г/моль \cdot экв.\right),$$

где Э – элемент или фрагмент молекулы, неизменяемый в реакции; z' – количество Э, принимающее участие в процессе.

Например, для реакции:

$$Al_2O_3 + 6HCl = 2AlCl_3 + 3H_2O;$$

$$Э \equiv Al; \quad M_Э\left(Al_2O_3\right) = \frac{M\left(Al_2O_3\right)}{2 \cdot 3}\left(г/моль \cdot экв.\right),$$

а для реакции:

$$UO_3 + 2HCl = UO_2Cl_2 + H_2O;$$

$$Э \equiv UO_2; \quad M_Э(UO_3) = \frac{M(UO_3)}{1 \cdot 2} (г/моль \cdot экв.).$$

Из приведённых примеров видно, что значение молярной массы эквивалента сложных веществ зависит от конкретной реакции, в которой они принимают участие. А значение молярной массы эквивалента элементов, входящих в состав сложного вещества – не зависит от реакции.

Следует подчеркнуть, что рассмотренные выше формулы для нахождения молярных масс эквивалентов сложных веществ, справедливы только в том случае если эти вещества не участвуют в окислительно – восстановительном процессе. Например, в реакции

$$2KMnO_4 + 3\,K_2SO_3 + H_2O = 2MnO_2 + 3\,K_2SO_4 + 2KOH;$$

$$M_Э(KMnO_4) = \frac{M(KMnO_4)}{n},$$

где n – количество электронов, получаемых перманганатом калия

$$M_Э(K_2SO_3) = \frac{M(K_2SO_3)}{n'};$$

n' – количество электронов, отдаваемых сульфитом калия. В данном случае

$$M_Э(KMnO_4) = \frac{M(KMnO_4)}{3} = \frac{158}{3} \approx 52,7\,(г/моль \cdot экв.);$$

$$M_Э(K_2SO_3) = \frac{M(K_2SO_3)}{2} = \frac{158}{2} = 79\,(г/моль \cdot экв.).$$

Обобщив, приведённые выше равенства, можно утверждать, что молярную массу эквивалента любого вещества ($M_Э$) рассчитывают по формуле (2.2):

$$M_Э = \frac{M}{l}\,(г/моль \cdot экв.), \qquad (2.2)$$

где M – молярная масса вещества, измеряемая в г/моль; l – количество эквивалентов, приходящееся на одну молекулу, численно равное количеству:

– валентностей (для простых веществ);

– функциональных связей (для сложных веществ, не участвующих в окислительно-восстановительном процессе);

– электронов, получаемых или отдаваемых молекулой (для сложных веществ, участвующих в окислительно-восстановительном процессе).

Подобно тому, как молярная масса вещества (M) представляет собой отношение массы (m) к количеству этого вещества (n)

$$M = \frac{m}{n}\ (\text{г}/\text{моль}),$$

а молярный объём газа ($V_о$) – отношение объёма (V), занимаемого им при нормальных условиях ($p \approx 10^5$ Па; t°C ≈ 0 °C)[19] к количеству газа ($n_г$):

$$V_о = \frac{V}{n_г}\ (\text{л}/\text{моль})$$

молярный объём эквивалента газообразного вещества ($V_э$) представляет собой отношение V к количеству молярных масс эквивалента $n_э$:

$$V_э = \frac{V}{n_э}\ (\text{л}/\text{моль}\cdot\text{экв})$$

из последних двух равенств вытекает соотношение

$$\frac{M}{M_э} = \frac{V_о}{V_э},$$

в котором все величины являются параметрами одного и того же газа.

Действительно:

$$\frac{V_о}{V_э} = \frac{V \cdot n_э}{n \cdot V} = \frac{n_э}{n} = \frac{m \cdot M}{M_э \cdot m} = \frac{M}{M_э}.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить молярные массы эквивалентов соединения H_3PO_4 в реакциях:

$$H_3PO_4 + 3KOH = K_3PO_4 + 3H_2O;$$

$$H_3PO_4 + 2KOH = K_2HPO_4 + 2H_2O;$$

$$H_3PO_4 + KOH = KH_2PO_4 + H_2O.$$

Рассчитать молярные массы эквивалентов каждого из атомов в H_3PO_4.

2. Определить эквивалентную массу Na_2SO_4 в реакциях:

$$Na_2SO_4 + BaCl_2 = BaSO_4 + 2NaCl;$$

$$Na_2SO_4 + H_2SO_4 = 2NaHSO_4.$$

[19] 0^5 Па ≈ 1 атм ≡ 760 мм рт. столба.

3. Определить молярную массу эквивалента Na_2O в реакциях:

$$Na_2O + 2HCl = 2NaCl + H_2O;$$

$$Na_2O + H_2O = 2NaOH.$$

4. Определить эквивалентную массу $Al(OH)_3$ в реакциях:

$$2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 = Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O;$$

$$Al(OH)_3 + H_2SO_4 = AlOHSO_4 + 2H_2O.$$

5. Рассчитать молярную массу эквивалента кислорода и определить объём, занимаемый молярной массой эквивалента кислорода при н.у.

6. Определить эквивалентные массы, молярные массы эквивалента метана (CH_4) и хлора в реакции

$$CH_4 + 4Cl_2 \longrightarrow CCl_4 + 4HCl.$$

1. Дайте определения эквиваленту молекулы сложного вещества и эквиваленту молекулы простого вещества?

2. По какой формуле можно рассчитать молярную массу эквивалента любого вещества?

3. Какое уравнение связывает молярную массу, молярный объём, молярную массу эквивалента и молярный объём эквивалента одного и того же газа.

§ 2.1.3. Закон эквивалентов. Закон приведённого количества вещества

Закон эквивалентов гласит:

Вещества взаимодействуют друг с другом равными количествами молярных масс эквивалентов:

$$n_{Э1} = n_{Э2},$$

где $n_{Э1}$ – количество молярных масс эквивалента одного вещества; $n_{Э2}$ – количество молярных масс эквивалента другого вещества, взаимодействующего с первым. Действительно, если рассчитать количества молярных масс эквивалентов взаимодействующих веществ для любой из рассмотренных выше реакций, то они окажутся равными.

Последнее равенство можно представить иначе:

$$\frac{m_1}{M_{Э1}} = \frac{m_2}{M_{Э2}}$$

или
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_{Э1}}{M_{Э2}},$$

где m_1 и m_2 – массы реагирующих веществ; $M_{Э1}$ и $M_{Э2}$ – молярные массы их эквивалентов.

Все три последние равенства являются математическими формами записи закона эквивалентов.

Согласно закону эквивалентов для реакции:
$$k_1A + k_2B = k_3C + k_4D$$
должно выполняться
$$\frac{m(A)}{M_Э(A)} = \frac{m(B)}{M_Э(B)},$$
где $m(A)$ и $m(B)$ массы веществ A и B соответственно, $M_Э(A)$ и $M_Э(B)$ – молярные массы их эквивалентов. Или в соответствии с (2):
$$\frac{m(A)\cdot l(A)}{M(A)} = \frac{m(B)\cdot l(B)}{M(B)},$$
где $M(A)$ и $M(B)$ молярные массы веществ A и B, $l(A)$ и $l(B)$ количества активных связей в молекулах A и B соответственно.

После простейшего преобразования можно легко получить:
$$\frac{m(A)}{M(A)\cdot l(B)} = \frac{m(B)}{M(B)\cdot l(A)},$$
поскольку, в данном случае $l(B) = k_1$; $l(A) = k_2$, то:
$$\frac{m(A)}{k_1\cdot M(A)} = \frac{m(B)}{k_2\cdot M(B)}. \qquad (2.3)$$

Так как последнее равенство справедливо для любой пары участвующих в реакции веществ (исходных и продуктов), то можно утверждать, что
$$\frac{m(A)}{k_1\cdot M(A)} = \frac{m(B)}{k_2\cdot M(B)} = \frac{m(C)}{k_3\cdot M(C)} = \frac{m(D)}{k_4\cdot M(D)}.$$

То есть, в пределах любой одной и той же химической реакции
$$\frac{m}{kM} = \text{const}, \qquad (2.4)$$
где $\frac{m}{kM}$ – ***приведённое количество вещества.***
$$\frac{m}{kM} = \frac{n}{k},$$
где n – количество вещества.

Приведённым количеством вещества называется отношение количества вещества к его стехиометрическому коэффициенту.

Равенства (2.3) и (2.4) представляют собой математические формы записи закона приведённого количества вещества, согласно которому

приведённые количества веществ участвующих в реакции (исходных и продуктов) равны между собой.

Закон приведённого количества вещества вытекает также из простого анализа привычных пропорций:

$$k_1A + k_2B = k_3C + k_4D;$$

$$\frac{m(A)}{m(B)} = \frac{k_1 \cdot M(A)}{k_2 \cdot M(B)};$$

$$\frac{m(A)}{k_1 \cdot M(A)} = \frac{m(B)}{k_2 \cdot M(B)}.$$

В общем случае

$$\frac{m(A)}{k_1 \cdot M(A)} = \frac{m(B)}{k_2 \cdot M(B)} = \frac{m(C)}{k_3 \cdot M(C)} = \frac{m(D)}{k_4 \cdot M(D)}$$

или

$$\frac{m}{kM} = \text{const}.$$

Согласно следствию закона приведённого количества вещества

приведённые количества элементов одного и того же сложного вещества равны между собой

$$\frac{m(\text{Э})}{i \cdot M(\text{Э})} = \text{const},$$

где m(Э) – масса или процентное содержание одного из элементов в данной навеске вещества; M(Э) – молярная масса этого элемента; i – индекс этого элемента в данном веществе, величина $\frac{m(\text{Э})}{i \cdot M(\text{Э})}$ – приведённое количество элемента.

Иногда, в одной и той же реакции вещество может проявлять различные молярные массы эквивалента, что может некорректно восприниматься

как нарушение закона эквивалентов. Например, при реакции разбавленной азотной кислоты с медью:

$$3Cu + 8HNO_3 \longrightarrow 3Cu(NO_3)_2 + 2NO + 4H_2O \qquad (2.5)$$

из восьми молекул азотной кислоты 2 молекулы являются окислителями, превращаясь в NO, а 6 молекул участвуют в процессе, не сопровождающемся изменением степени окисления. То есть, вся реакция делится на два взаимодействия:

$$3Cu + 2HNO_3 \longrightarrow 3Cu^{2+} + 2NO + H_2O + 3O^{2-};$$

$$3O^{2-} + 6HNO_3 \longrightarrow 6NO_3^- + 3H_2O.$$

Хотя, реально частица O^{2-} не существует, однако, из приведённой схемы видно, что в первом взаимодействии.

$$M_Э(HNO_3) = \frac{M(HNO_3)}{3}.$$

А во втором взаимодействии

$$M_Э(HNO_3) = \frac{M(HNO_3)}{1},$$

при этом, в обоих случаях закон эквивалентов выполняется – количества молярных масс эквивалентов всех взаимодействующих веществ и частиц равны шести.

При составлении уравнений окислительно-восстановительных реакций, стехиометрические коэффициенты перед восстановителем ($k_в$), отдающим $n_в$ электронов, и перед окислителем ($k_о$), принимающим $n_о$ электронов, можно рассчитывать с помощью следующих формул:

$$k_в = \frac{n_о + m_в}{N} = \frac{k'_в}{N}; \qquad (2.6)$$

$$k_о = \frac{n_в + m_о}{N} = \frac{k'_о}{N}, \qquad (2.7)$$

где $m_в$ – количество молекул восстановителя, не участвующих в восстановлении; $m_о$ – количество молекул окислителя, не принимающих участия в окислении; N – максимальное число, которому кратны все коэффициенты уравнения. Например, для реакции (2.5)

$$n_о = 3; \quad n_в = 2; \quad m_о = 6; \quad m_в = 0; \quad N = 1,$$

поэтому

$$k_в = \frac{3+0}{1} = 3;$$

$$k_o = \frac{2+6}{1} = 8.$$

Примеры решения задач

1. Пользуясь, следствиями закона эквивалентов, определить массу алюминия, израсходованного на получение 5,1 г оксида алюминия, если молярная масса алюминия 27 г/моль, молярная масса оксида алюминия 102 г/моль.

Прежде, чем приступить к решению подобной задачи целесообразно записать уравнение реакции

$$4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3.$$

Дано:	*Решение:*
$m(Al_2O_3) = 5{,}1$ г $M(Al) = 27$ г/моль $M(Al_2O_3) = 102$ г/моль $k_1 = 4$ моль $k_2 = 2$ моль	Согласно следствию закона эквивалентов: $\frac{m(Al)}{k_1 \cdot M(Al)} = \frac{m(Al_2O_3)}{k_2 M(Al_2O_3)}$
$m(Al)$ – ?	или $m(Al) = \frac{k_1 \cdot m(Al_2O_3) \cdot M(Al)}{k_2 M(Al_2O_3)}$; $m(Al) = \frac{4 \cdot 5{,}1 \cdot 27}{2 \cdot 102} = 2{,}7$ г.

Ответ: $m(Al) = 2{,}7$ г.

2. Пользуясь равенствами 2.6 и 2.7 расставить коэффициенты в схеме реакции взаимодействия цинка с очень разбавленной азотной кислотой:

$$Zn + HNO_3 \longrightarrow Zn(NO_3)_2 + NH_3 + H_2O.$$

Решение

В данной реакции окислителем является азотная кислота, в которой атом азота принимает 8 электронов, то есть $n_о = 8$. Поскольку $m_в = 0$, то $k'_в = 8$. Окисленной формы цинка в правой части уравнения также должно быть 8 атомов.

$$8Zn + HNO_3 \longrightarrow 8Zn(NO_3)_2 + NH_3 + H_2O.$$

Из последней схемы видно, что $m_о = 16$; $n_в = 2$. Следовательно $k'_о = 2 + 16 = 18$. Восстановленной формы азота в правой части уравнения должно быть только два атома

$$8Zn + 18HNO_3 \longrightarrow 8Zn\left(NO_3\right)_2 + 2NH_3 + 6H_2O.$$

Все коэффициенты можно сократить на 2, то есть в данном случае $N = 2$. Поэтому, окончательно $k_в = 4$; $k_о = 9$

$$4Zn + 9HNO_3 \longrightarrow 4Zn(NO_3)_2 + NH_3 + 3H_2O.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Пользуясь законом приведённого количества вещества, определить массу сульфита натрия, необходимую для полного превращения 0,2 моль перманганата калия в сульфат марганца по реакции:

$$2KMnO_4 + 5Na_2SO_3 + 3H_2SO_4 = 2MnSO_4 + 5Na_2SO_4 + K_2SO_4 + 3H_2O. \quad (2.8)$$

Сколько грамм воды выделится в результате этой реакции?

2. Определить массу бихромата калия, необходимую для полного превращения 49,8 г. иодида калия в йод по реакции:

$$K_2Cr_2O_7 + 7H_2SO_4 + 6KI = Cr_2(SO_4)_3 + 4K_2SO_4 + 3I_2 + 7H_2O. \quad (2.9)$$

Сколько грамм йода образуется в результате этой реакции?

Решить задачу двумя способами – пользуясь пропорциями и пользуясь законом приведёного количества вещества.

3. Пользуясь законом приведённого количества вещества, определить химическую формулу оксида меди, если в нём содержится 89 массовых процента меди, и 11 массовых процента кислорода.

4. Пользуясь равенствами (2.6) и (2.7) расставить коэффициенты в схеме реакции:

$$Mg + HNO_3 \longrightarrow Mg\left(NO_3\right)_2 + N_2O + H_2O.$$

---

1. Сформулируйте закон эквивалентов и закон приведённого количества вещества.

2. Что такое приведённое количество вещества?

3. Выведите закон приведённого количества вещества из закона эквивалентов.

§ 2.1.4. Скорость химических реакций

Раздел химии, изучающий скорости химических реакций называется химической кинетикой.

Если под скоростью движения подразумевают векторную величину $\overline{dS}/dt$, где t – время; S – вектор перемещения, то *скоростью химической реакции по веществу A (v(A)) называется скалярная величина* $|dC(A)/dt|$, где *C(A)* – концентрация или масса реагирующего вещества. Другими словами, если под скоростью движения подразумевают скорость направленного приращения расстояния, то *скоростью химической реакции по веществу A называется абсолютное значение скорости приращения концентрации или массы вещества A.* Например, если скорость реакции

$$2NO + O_2 = 2NO_2$$

по кислороду равна 0,01 моль/л·с[20], то при тех же самых условиях скорость этой же реакции по NO окажется равной 0,02 моль/л·с, потому что, согласно уравнению реакции, оксида азота (II), расходуется в 2 раза больше, чем кислорода. При этом, скорость реакции по оксиду азота (IV) также равна 0,02 моль/л·с. Во избежание зависимости значения скорости от выбора вещества пользуются понятием «скорость химической реакции».

Скоростью химической реакции (v) называется скалярная величина $\frac{|dC/dt|}{n}$, где n – стехиометрический коэффициент при реагирующем веществе или продукте реакции. Иными словами, с*коростью химической реакции называется отношение скорости химической реакции по веществу к стехиометрическому коэффициенту этого вещества.* Для рассмотреной реакции $v = 0{,}01$ моль/л·с независимо от того, расход какого из реагирующих веществ измеряется. Скорость реакции, определённая по образованию продукта реакции, при этом окажется равной также 0,01 моль/л·с.

В простейших случаях мономолекулярных реакций твёрдых веществ, т. е. в случаях превращений молекул твёрдых веществ без взаимодействия с другими веществами, концентрация представляет собой неизменную плотность. Поэтому скорость таких реакций иногда определяют через изменение массы m:

$$v = |dm/dt|.$$

[20] То есть, за одну секунду концентрация кислорода уменьшится на 0,01 моль/л. В химии традиционно не придерживаются системы СИ – объёмы нередко измеряют в литрах, а массу в граммах.

Например, для реакции[21] $Cu(OH)_2$(к.) = CuO + H_2O

$$v = \frac{\left| dm\ \left(Cu(OH)_2 \right) \right|}{dt};$$

для реакции $^{226}_{88}Ra = {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$

$$v = \frac{\left| dm\left({}^{226}_{88}Ra \right) \right|}{dt}.$$

Равенства с $Cu(OH)_2$ описывают реакцию *разложения*, протекающую без изменения состава ядер атомов. Равенства с $^{226}_{88}Ra$ представляют реакцию *распада*, протекающую с разрушением ядра атома. В обоих случаях скорость процесса пропорциональна массе m разрушающегося вещества:

$$v = km, \tag{2.10}$$

где k – константа скорости химической реакции. Причём, константа скорости реакции *распада* называется *постоянной распада*. Выражение (2.10) иначе можно записать так:

$$\frac{dm}{dt} = -km.$$

Строго говоря, величина $\frac{dm}{dt}$ уже не является скоростью химической реакции, поскольку приведена без модуля. Величина $\frac{dm}{dt}$ – представляет собой отрицательное изменение (уменьшение) массы во времени, т.е. $\frac{dm}{dt} < 0$.

$$\frac{dm}{dt} = -kdt; \quad \int_{m_0}^{m} \frac{dm}{m} = -\int_{t_0}^{t} kdt;$$

$$\ln \frac{m}{m_0} = -k \cdot \left(t - t_0 \right).$$

Полагая, что $t_0 = 0$, можно записать $m = m_o \cdot e^{-kt}$.

Поскольку $m = NM$; $m_0 = N_0M$, где M – молекулярная масса вещества; N_0 и N – количество молекул вещества в начальный момент времени и по истечении времени t соответственно, то можно записать

$$N = N_o \cdot e^{-kt}. \tag{2.11}$$

[21] Значок (к.) означает кристаллическое агрегатное состояние вещества.

Обозначив время, в течение которого разлагаются или распадаются половина молекул (период полураспада) через T, последнее равенство можно преобразовать:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-kT};$$

$$\frac{1}{2} = e^{-kT};$$

$$kT = \ln 2.$$

Если равенство (2.11) представить в виде

$$N = N_0 \cdot e^{-kt} = N_0 \cdot e^{-kt\frac{T}{T}} = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}\ln 2} =$$

$$= N_0 \cdot \left(e^{\ln 2}\right)^{-\frac{t}{T}} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

То, получается, что

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \qquad (2.12)$$

Равенства (2.11) и (2.12) представляют собой две формы *закона радиоактивного распада,* широко используемого при изучении реакций самопроизвольного распада радиоактивных элементов, таких как уран, нептуний, плутоний и др. Радиоактивными их стали называть из-за радиации, нередко сопровождающей распад[22]. Критерием устойчивости таких элементов как раз и является период полураспада. Как видно из предыдущих рассуждений, закон радиоактивного распада представляет собой лишь частный случай законов химической кинетики.

Следует отметить, что скорости мономолекулярных реакций разложения газообразных и растворённых веществ пропорциональны концентрации C лишь при небольших значениях концентраций. В частности, скорость разложения водного раствора гидроксида меди подчиняется равенству:

$$v = kC \qquad (2.13)$$

только при невысоких значениях C.

Из (2.10) и (2.13) следует, что $\frac{v}{m} = k$ или $\frac{v}{C} = k$, где $\frac{v}{m}$ или $\frac{v}{C}$ – удельная скорость химической реакции.

[22] Под радиацией подразумеваются излучения: положительно заряженных осколков ядер (α-излучение) отрицательно заряженных электронов (β-излучение), нейтронов, а также электромагнитных волн высокой частоты (γ-излучение)

Удельная скорость мономолекулярных химических реакций постоянна, т. е. не зависит от массы или концентрации вещества.

Понятие «удельная скорость» применимо только к мономолекулярным процессам и неприменимо к реакциям, протекающим в результате столкновения молекул различного состава. Поэтому, в дальнейшем будем анализировать только скорость, не прибегая к рассмотрению удельной скорости.

Скорость реакций распада не зависит от температуры. Скорости же химических реакций, не сопровождающихся изменением состава ядра, в том числе и реакций разложения, зависят от температуры. Установлено, что при повышении температуры на каждые 10 °С скорость большинства таких реакций увеличивается в 2–4 раза.

Рассмотренные выше процессы относятся к *реакциям первого порядка*, т. к. их скорости зависят от концентрации (или массы) вещества в первой степени.

Скорости *бимолекулярных реакций* растворённых или газообразных веществ, т. е. скорости превращений, протекающих в результате химического взаимодействия двух молекул разных веществ *A* и *B* описываются равенством:

$$v = k\,[A]\,[B],$$

где [*A*] и [*B*] – концентрации веществ *A* и *B* соответственно, *k* константа скорости химической реакции. Например, для процесса

$$H_2 + I_2 = 2HI;$$

$$v = k\,[H_2]\,[I_2]. \qquad (2.14)$$

Тримолекулярные реакции протекают в результате столкновения трёх молекул[23], например:

$$2NO + O_2 = 2NO_2.$$

Скорость приведённой реакции описывается равенством

$$v = k\,[NO]^2 \cdot [O_2]. \qquad (2.15)$$

На основании равенств (2.13)–(2.15) был сформулирован закон действия масс, который гласит: «*Скорость простейшей (элементарной) реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, взятых в степенях, равных соответствующим стехиометрическим коэффициентам*». При этом под элементарными подразумеваются

[23] Строго говоря, столкновение трёх молекул не является одновременным. На первой стадии из двух частиц А и Б образуется промежуточная частица АБ, которая далее реагирует с молекулой С, образуя продукты реакции.

реакции, протекающие в одну стадию. Показатель степени концентрации вещества в уравнениях для скорости химической реакции принято называть порядком реакции по этому веществу. Сумма порядков реакции называется общим порядком реакции. Например, порядок реакции (2.14) по водороду равен единице, по йоду – тоже единице. Общий порядок этой реакции равен двум, поэтому она относится к *реакциям второго порядка*. Порядок реакции (2.15) по NO равен двум, а по кислороду равен единице. Общий порядок реакции (2.15) равен трём, поэтому она относится к *реакциям третьего порядка*. Однако, следует иметь в виду, что реакции, описанные уравнениями (2.8) и (2.9) не могут быть простыми, потому что для этого необходимо столкновение десяти или даже четырнадцати молекул. Причём, трёх различных веществ. Вероятность такого события, практически равна нулю. Скорости реакций (2.8) и (2.9) не подчиняются закону действия масс в его классической формулировке, потому что протекают по сложному механизму, представляющему собой последовательность многочисленных мономолекулярных, бимолекулярных, тримолекулярных реакций. Общий порядок реакций, подчиняющихся закону действия масс, не может превышать 3.

В общем случае *скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, взятых в степенях, определяемых экспериментально.* То есть, для реакций (2.8) и (2.9) можно записать:

$$v = k\cdot[KMnO_4]^a\cdot[Na_2SO_3]^b\cdot[H_2SO_4]^C; \qquad (2.16)$$

$$v = k\cdot[K_2Cr_2O_7]^f\cdot[H_2SO_4]^g\cdot[KI]^h, \qquad (2.17)$$

где a, b, c, f, g, h – экспериментально определяемые порядки реакций по соответствующему веществу, отличные от их стехиометрических коэффициентов.

Следует подчеркнуть, что уравнения (2.14)–(2.17) справедливы для процессов протекающих в растворе или газовой фазе. Если же взаимодействующие вещества находятся в твёрдом состоянии, например

$$Fe + S = FeS,$$

то скорость реакции прямо пропорциональна поверхности реагирующих веществ. На величину константы скорости большое влияние оказывает присутствие катализаторов и ингибиторов. Вещества, которые ускоряют химические реакции, но сами при этом не расходуются, называют *катализаторами*. Вещества, которые замедляют скорость химических реакций, называют *ингибиторами*. Например, реакция $2SO_2 + O_2 = 2SO_3$ протекает значительно быстрее в присутствии V_2O_5. А окисление

металлических изделий (коррозия), соприкасающихся с растворами, может быть предотвращено добавлением таких ингибиторов как $NaNO_2$, K_2CrO_4, $K_2Cr_2O_7$, Na_3PO_4 и др.

Примеры решения задач

1. Для реакции, подчиняющейся закону действия масс, определить во сколько раз изменится скорость реакции, если концентрацию первого вещества увеличить в 2 раза, а концентрацию второго уменьшить в 2 раза?

$$N_2 + 3H_2 = 2NH_3;$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2.$$

Прежде чем приступить к решению задачи необходимо определиться какая из двух реакций подчиняется закону действия масс. Общий порядок первой реакции равен 4. Поэтому она не может подчиняться закону действия масс. Общий порядок второй реакции равен трём. Значит, именно реакция окисления угарного газа подчиняется закону действия масс.

Дано:	*Решение:*
$\frac{[CO]}{[CO]_0} = 2$ $\frac{[O_2]}{[O_2]_0} = \frac{1}{2}$	$v = k\,[CO]^2 \cdot [O_2];$ $v_0 = k[CO]_0^2 \cdot [O_2]_0;$ $\frac{v}{v_0} = \left(\frac{[CO]}{[CO]_0}\right)^2 \cdot \frac{[O_2]}{[O_2]_0} = 2^2 \cdot \frac{1}{2} = 2.$
$\frac{v}{v_0} - ?$	

Ответ: $\frac{v}{v_0} = 2.$

2. Определить постоянную распада k калифорния (*Cf*) если период его полураспада T равен одному году. Сколько нераспавшегося калифорния останется от 1 кг через 1,5 года хранения.

Дано:	*Решение:*
$T = 1$ год $t = 1{,}5$ года $m_o = 1$ кг	Взаимосвязь постояной распада и периода полураспада любого радиоактивного вещества определяется равенством $kT = \ln 2.$
$k - ?$ $m - ?$	

Следовательно

$$k = \frac{\ln 2}{T};$$

$$k = \frac{\ln 2}{1} = \ln 2 \approx 0{,}69 \left(\text{год}^{-1} \right).$$

I способ нахожения m

$$m = m_{\text{о}} \cdot e^{-kt};$$

$$m = 1 \cdot e^{-1{,}5 \cdot \ln 2} = 2^{-1{,}5} = \frac{1}{2^{1{,}5}} \approx 0{,}354 \left(\text{кг} \right) \equiv 354 \left(\text{г} \right).$$

II способ нахождения m

$$m = m_{\text{о}} \cdot 2^{-\frac{t}{T}};$$

$$m = 1 \cdot 2^{-1{,}5} \approx 0{,}354 \text{ (кг)} \equiv 354 \text{ (г)}.$$

Ответ: $k \approx 0{,}69$ год$^{-1}$; $m \approx 354$ г.

Задачи для самостоятельного решения

1. Для реакции, подчиняющейся закону действия масс, определить во сколько раз изменится скорость реакции, если концентрации обоих реагирующих веществ увеличить в 3 раза?

$$CO_2 + H_2 = CO + H_2O;$$

$$2C_2H_2 + 5O_2 = 4CO_2 + 2H_2O.$$

2. Определить постоянную распада кюрия (Cm) если период его полураспада равен 10^6 лет. Сколько не распавшегося кюрия останется от 300 г. через 500 000 лет.

3. Определить размерность и значение константы скорости для каждой из следующих химических реакций:

$$A \rightarrow C;$$

$$A + B = C;$$

$$2A + B = C,$$

если во всех трёх случаях:

– реакции подчиняются закону действия масс;

– $d[C]/dt = 0{,}5$ моль/л·с;

– $[A] = 0{,}2$ моль/л.

В последних двух реакциях $[B] = 0{,}3$ моль/л.

1. Что такое химическая кинетика? Дайте определение скорости химической ре акции по веществу и скорости химической реакции.

2. Что такое мономолекулярная реакция? Бимолекулярная? Тримолекулярная? Приведите конкретные примеры. Возможно ли протекание тетрамолекулярных и пентамолекулярных реакций?

3. Сформулируйте закон действия масс и расскажите о границах его применимости.

4. Как влияют на скорость химической реакции температура, катализаторы, ингибиторы?

§ 2.1.5. Теоретические основы органической химии

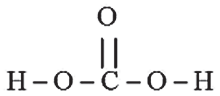
Классическая химия разветвилась на огромное количество самостоятельных разделов: органическая химия, неорганическая химия, аналитическая химия, физическая химия, коллоидная химия и так далее. В предыдущих параграфах раздела «Химия» рассматривались закономерности, изучаемые всеми этими разделами и поэтому относящиеся к общей химии. То есть, общая химия – это наука, изучающая наиболее общие химические закономерности, рассматриваемые всеми разделами химии.

В следующих параграфах будут изложены закономерности, изучаемые органической химией.

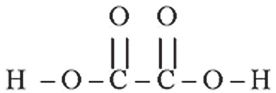
Органическая химия – раздел химии, изучающий химические свойства органических веществ.

Разумеется, при таком определении возникает вопрос, а что такое органические вещества?

Органические вещества – соединения *четырёхвалентного углерода*, за исключением нескольких веществ, традиционно считающихся неорганическими (CO_2; H_2CO_3; Na_2CO_3, CS_2 и др.). То есть, нет строгой границы, разделяющей вещества органические и неорганические. Например, состав и строение угольной кислоты H_2CO_3,



совершенно аналогичны составу и строению щавелевой кислоты $H_2C_2O_4$,



Однако, в силу условной традиции, первую принято считать неорганическим соединением, а вторую органическим.

Теоретической основой всей органической химии по сей день, остается теория химического строения органических веществ, решающую роль в развитии которой, сыграл Александр Михайлович Бутлеров (1828–1886 гг.), сформулировавший основные идеи этой теории в виде следующих положений:

1. Все атомы, образующие молекулы органических веществ, связаны в определённой последовательности согласно их валентностям.

2. Свойства веществ зависят не только от природы и количества атомов, входящих в состав молекулы, но и от порядка соединения атомов в молекуле.

3. По свойствам данного вещества можно определить строение его молекулы, а по строению молекулы предвидеть свойства.

4. Атомы и группы атомов в молекулах веществ, взаимно влияют друг на друга.

Второе положение теории строения органических веществ объяснило, в частности, явление *изомерии* – возможность существования соединений, описываемых одной и той же молекулярной формулой, но обладающих различными свойствами. Именно различия в порядке соединения атомов в молекуле, то есть различия в строении, стали объяснением различия свойств молекул одинакового состава. Вещества, описываемые одной и той же молекулярной формулой, но отличающиеся строением называются *изомерами.* Реакции превращения одних изомеров в другие называются реакциями *изомеризации.* Например, пентан, обладающий температурой кипения 36,1 °С и описываемый молекулярной формулой C_5H_{12}, при нагревании в присутствии катализатора может превращаться в изопентан (2-метилбутан),

$$\underset{\text{пентан}}{CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3} \xrightarrow{t,\,AlCl_3} \underset{\substack{\text{2-метилбутан}\\ \text{(изопентан)}}}{CH_3-\overset{\overset{CH_3}{|}}{CH}-CH_2-CH_3} \qquad (2.18)$$

обладающий температурой кипения 27,8 °С, хотя и описываемый точно такой же молекулярной формулой.

§ 2.1.6. Алканы. Циклоалканы

В традиционной классификации органических веществ алканы и циклоалканы относятся к углеводородам.

Углеводороды – это органические вещества, состоящие только из двух элементов – углерода и водорода. Углеводороды подразделяются на циклические (с замкнутыми молекулярными цепями) и ациклические (с незамкнутыми молекулярными цепями). Например:

$$\begin{array}{c} CH_2 - CH_2 \\ | \qquad\quad | \\ CH_2 - CH_2 \end{array}$$

циклобутан
(циклический углеводород)

$$H_3C - CH_2 - CH_2 - CH_3$$

бутан
(ациклический углеводород)

Углеводороды, молекулы которых образованы с помощью только ординарных связей, называются предельными (насыщенными) углеводородами.

Предельные *ациклические* углеводороды называются **алканами** или парафинами. Простейшим алканом является метан, молекулярная формула которого CH_4.

Для того, чтобы разобраться в строении метана необходимо вспомнить особенности электронного строения атома углерода.

Атом углерода в невозбуждённом состоянии включает в себя два спаренных *s* – электрона на первом энергетическом уровне, два спаренных *s*-электрона на втором энергетическом уровне и два неспаренных *p*-электрона на том же втором энергетическом уровне (рис. 2.1)

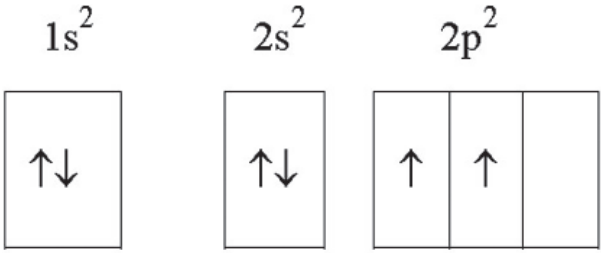


Рис. 2.1. Схема электронного строения атома углерода в невозбуждённом состоянии

Но при образовании органических соединений углерод получает дополнительную энергию, в результате чего становится обладателем четырёх неспаренных электронов, способных к взаимодействию (рис. 2.2).

Причём, один из них s-электрон, вращающийся по сферической s-орбитали, и три p-электрона, вращающихся по трём гантелеобразным p-орбиталям (рис. 2.3).

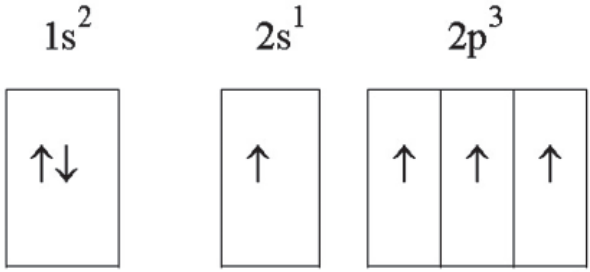


Рис. 2.2. Схема электронного строения атома углерода в возбуждённом состоянии

Казалось бы, будучи четырёхвалентным, возбуждённый углерод не может образовывать с атомами водорода четырёх одинаковых связей, поскольку формы s-орбитали и p-орбитали существенно различаются. Однако, все экспериментальные измерения неизменно указывали на эквивалентность всех четырёх углерод – водородных связей в молекуле метана. Объяснение этому факту удалось найти только после открытия явления гибридизации атомных орбиталей. Оказалось, что в предельных углеводородах все атомы углерода обладают sp^3-валентными электронами, то есть электронами, вращающимися по четырем гибридизованным sp^3-орбиталям (рис. 3).

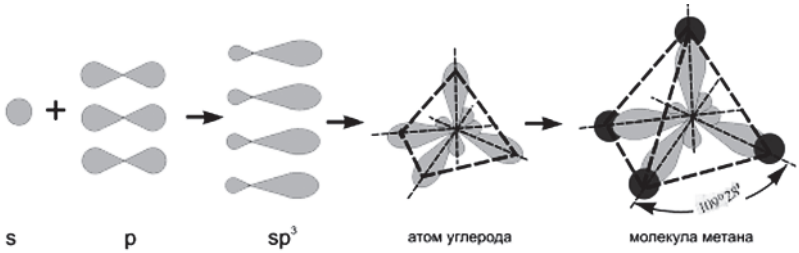


Рис. 2.3. Схема гибридизации атомных орбиталей возбуждённого атома углерода и образования молекулы метана[24]

Все алканы описываются общей формулой C_nH_{2n+2} (где n – целое положительное число), образуя между собой гомологический ряд, каждый представитель которого отличается от предыдущего на группу CH_2,

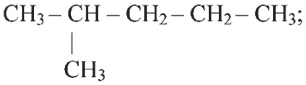
[24] Строение метана аналогично строению тетраэдра, рассмотренного в учебном пособии Шепель О.М., Чабовская Н.И. «Математика». – Томск: ЦНТИ, 2010, 124 с. (С. 131). В молекуле метана вершинами тетраэдра являются атомы водорода, центром тетраэдра – атом углерода.

называемую гомологической разницей. Органические вещества, отличающиеся друг от друга на одну или несколько групп CH_2 называются гомологами. Первые десять гомологов предельных углеводородов *неразветвлённого* (нормального) строения указаны в табл. 2.1. В этой же таблице приведены названия *радикалов* – частиц, образованных отщеплением от органической молекулы атома водорода. Радикалы не являются молекулами. Они представляют собой неустойчивые «осколки», приобретающие стабильность только в составе целой молекулы. Название большинства радикалов предельных углеводородов, образовавшихся отщеплением одного атома водорода, формируется заменой суффикса –ан, на –ил.

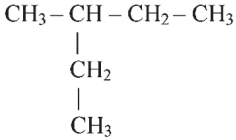
Для составления названия *разветвлённых* предельных углеводородов придерживаются следующих правил:

1. *Выбирают в структурной формуле наиболее длинную углеродную цепь и нумеруют в ней символы атомов углерода, начиная с того конца, к которому ближе разветвление.*

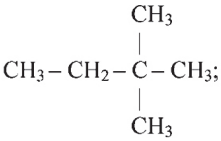
2. *Называют заместители* (начиная с простейшего) и *при помощи цифр указывают их место у нумерованных атомов углерода*. Если у одного и того же атома углерода находятся два одинаковых заместителя, тогда номер повторяют дважды. Число одинаковых заместителей указывают при помощи чисел на греческом языке («ди» – два, «три» – три, «тетра» – четыре, «пента» – пять и т.д.). Например:



2 – метилпентан

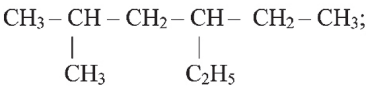


3 – метилпентан



2, 2 - диметилбутан

2, 3 - диметилбутан



2 – метил – 4 – этилгексан

Таблица 2.1

Гомологический ряд предельных углеводородов (ряд метана)

Название углеводорода	Молекулярная формула углеводорода	Структурная формула Углеводорода (полная или сокращённая)	Агрегатное состояние углеводорода при н.у.	Температура кипения углеводорода при н.у.в °С	Молекулярная формула радикала	Названис радикала
Метан	CH_4	H | H– C – H | H	Газ	-161,6	CH_3 –	Метил
Этан	C_2H_6	H H | | H– C – C– H | | H H	Газ	-88,6	C_2H_5–	Этил
Пропан	C_3H_8	$H_3C – CH_2 – CH_3$	Газ	- 42,1	C_3H_7 –	Пропил
Бутан	C_4H_{10}	$H_3C – CH_2 – CH_2 – CH_3$	Газ	- 0,5	C_4H_9 –	Бутил
Пентан	C_5H_{12}	$H_3C – (CH_2 –)_3 CH_3$	Жидкость	+36,07	C_5H_{11} –	Пентил
Гексан	C_6H_{14}	$H_3C – (CH_2 –)_4 CH_3$	Жидкость	+ 68,7	C_6H_{13} –	Гексил
Гептан	C_7H_{16}	$H_3C – (CH_2 –)_5 CH_3$	Жидкость	+98,5	C_7H_{15} –	Гептил
Октан	C_8H_{18}	$H_3C – (CH_2 –)_6 CH_3$	Жидкость	+125,6	C_8H_{17} –	Октил
Нонан	C_9H_{20}	$H_3C – (CH_2 –)_7 CH_3$	Жидкость	+150,7	C_9H_{19} –	Нонил
Декан	$C_{10}H_{22}$	$H_3C – (CH_2 –)_8 CH_3$	Жидкость	+174,0	$C_{10}H_{21}$ –	Децил

Приведённые правила были разработаны международным союзом теоретической и прикладной химии – International Union of Pure and Applied Chemistry, сокращённо IUPAC (ИЮПАК). В дальнейшем, названия веществ, составленные в соответствии с этими правилами будем называть систематическими. Однако, по сей день наряду с систематическими названиями нередко используются названия традиционные (тривиальные), сложившиеся задолго до возникновения IUPAC. Например, систематическое название продукта реакции (18) (2-метилбутан) и его тривиальное название (изопентан) используются одинаково часто.

Физические свойства

Как видно из таблицы, первые четыре гомолога предельных углеводородов представляют собой газы при нормальных условиях. Алканы неразветвлённого строения находятся в жидком агрегатном состоянии начиная с пентана и вплоть до углеводорода $C_{15}H_{32}$ (пентадекан). Начиная с гексадекана ($C_{16}H_{34}$), алканы нормального строения – твёрдые вещества. Первым твёрдым разветвлённым насыщенным углеводородом является 2,2,3,3 – тетраметилбутан. В целом, температура кипения алканов повышается с увеличением массы и разветвлённости макромолекулы.

Химические свойства

Под химическими свойствами органических веществ в настоящем курсе будем подразумевать их способность вступать в реакции *соединения, разложения, замещения, обмена*, рассматривая в качестве критерия классификации состав исходных веществ и продуктов реакции. Хотя, следует иметь в виду, что разнообразие превращений органических веществ настолько велико, что не укладывается в узкие рамки указанной классификации. В частности, приведённая выше реакция изомеризации (2.18) не может быть отнесена ни к одной из перечисленных групп. Кроме того, процессы соединения и разложения могут протекать одновременно в одной и той же реакции. Например, при нагревании метана до 1500 °С образуются ацетилен и водород:

$$2CH_4 \longrightarrow \underset{\text{ацетилен}}{H-C\equiv C-H} + 3\,H_2 \qquad (2.19)$$

То есть, с одной стороны происходит отщепление водорода, а с другой стороны, атомы углерода соединяются в одну молекулу тройной связью.

Реакции соединения. Для алканов реакции соединения не характерны. Валентности молекул этих веществ проявляют себя насыщенными до предела. Именно поэтому их стали называть насыщенными или предельными углеводородами.

Реакции разложения. Примером реакций разложения алканов может служить образование углерода и водорода при нагревании метана до температуры свыше 1000 °С без доступа воздуха:

$$CH_4 \longrightarrow C + 2H_2.$$

Если в этих же условиях метан нагреть до 1500 °С протекает реакция (2.19).

Этан при разложении может образовывать этилен и водород (реакция дегидрирования):

$$H_3C-CH_3 \longrightarrow \underset{\text{этилен}}{H_2C=CH_2} + H_2$$

Однако, следует иметь в виду, что в отсутствие воздуха для любого алкана можно подобрать температуру и давление при которых он распадётся на углерод и водород:

$$C_nH_{2n+2} \longrightarrow nC + (n+1)H_2.$$

Реакции замещения. При освещении смеси метана с Cl_2, водород замещается атомами хлора:

$$CH_4 + Cl_2 \longrightarrow \underset{\textit{хлорметан}}{CH_3Cl} + HCl;$$

$$CH_3Cl + Cl_2 \longrightarrow \underset{\textit{дихлорметан}}{CH_2Cl_2} + HCl;$$

$$CH_2Cl_2 + Cl_2 \longrightarrow \underset{\textit{трихлорметан (хлороформ)}}{CHCl_3} + HCl;$$

$$CHCl_3 + Cl_2 \longrightarrow \underset{\textit{тетрахлорметан}}{CCl_4} + HCl.$$

Атомы или радикалы, замещающие водород в молекулах углеводорода иногда называют заместителями. В хлорметане, дихлрметане, трихлорметане и тетрахлорметане заместителем является хлор. А в 2-метилбутане (реакция (2.18)) в качестве заместителя одного из атомов водорода бутана можно воспринимать метил. Метан легко сгорает бесцветным пламенем, в результате чего атомы водорода замещаются атомами кислорода:

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O.$$

Накапливаясь в угольных шахтах метан образует с воздухом взрывчатую смесь, несвоевременное обнаружение которой приводит порой к несчастным случаям.

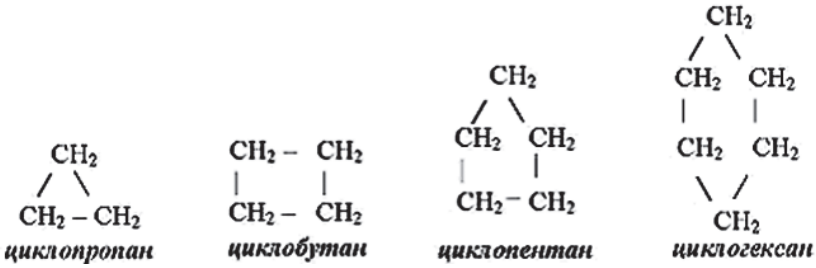
Следует иметь в виду, что если в качестве критерия классификации принять изменение степени окисления у атомов взаимодействующих молекул, то рассмотренные выше реакции разложения и замещения можно рассматривать как окислительно-восстановительные. При этом, восстановителем во всех случаях служит атом углерода, а окислителем – атомы водорода, хлора и кислорода. Подавляющее число органических реакций являются окислительно-восстановительными.

Реакции обмена. При 800–900 °C и в присутствии катализаторов (Ni, MgO или Al_2O_3) метан взаимодействует с водой и углекислым газом:

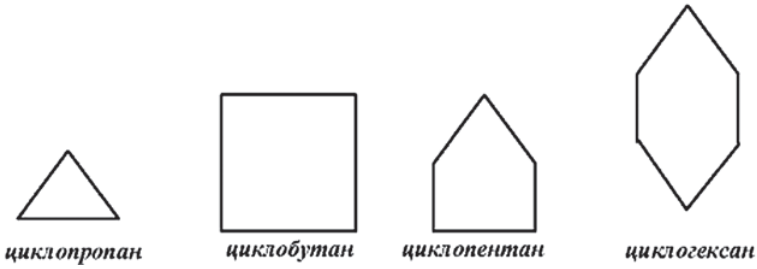
$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2;$$

$$CH_4 + CO_2 \longrightarrow 2CO + 2H_2.$$

Предельные циклические углеводороды с общей молекулярной формулой C_nH_{2n} называются **циклоалканами**:



Иногда структурные формулы циклоалканов представляют простыми геометрическими фигурами



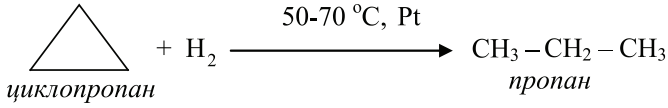
Каждый угол таких многоугольников символизирует углерод, соединённый с двумя атомами водорода σ – связью:

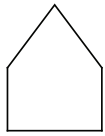
Физические свойства

Циклопропан и циклобутан при нормальных условиях – газы, а циклопентан и циклогексан – жидкости.

Химические свойства

Основное отличие химических свойств циклоалканов от химических свойств алканов состоит в способности вступать в реакции соединения:





$$+ H_2 \xrightarrow{350\ ^{o}C,\ Pt} CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_2 - CH_3$$

циклопентан *пентан*

Поведение циклоалканов при разложении, их свойство вступать в реакции замещения и обмена аналогичны поведению и свойствам алканов.

Хотя способность циклоалканов вступать в реакции присоединения сближает их с непредельными углеводородами, однако главным критерием классификации органических веществ является их строение. Поскольку молекулы циклоалканов образованы с помощью только ординарных связей, то они относятся к предельным углеводородам.

---

1. Определить степени окисления всех элементов исходных веществ и продуктов реакции взаимодействия:

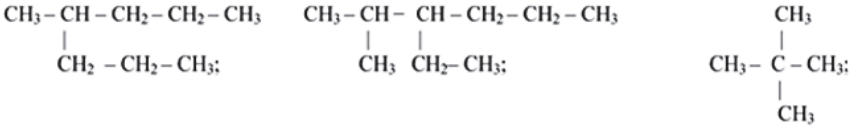
– метана с кислородом;

– метана с водой;

– метана с углекислым газом.

2. Какой из элементов метана является окислителем, а какой восстановителем в процессе его разложения на углерод и водород. Почему?

3. Дайте систематические названия следующим соединениям:



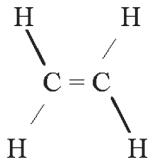
4. Составьте структурную формулу первого твёрдого разветвлённого алкана (2,2,3,3 – тетраметилбутан).

5. В чём состоит основное отличие химических свойств циклоалканов от химических свойств алканов. Приведите примеры.

§ 2.1.7. Алкены. Алкины. Алкадиены

Углеводороды, в молекулах которых присутствует двойная (C = C) или тройная (C ≡ C) углерод – углеродная связь, называются непредельными углеводородами. Связи C = C и C ≡ C в отличие от ординарных

называют кратными. Кратные связи являются функциональными группами углеводородов. Фрагменты органических молекул, строение и состав которых отличаются от строения и состава предельных углеводородов называются *функциональными группами*. Непредельные углеводороды, имеющие одну двойную связь называются углеводородами ряда этилена или алкенами (олефинами) и описываются общей формулой C_nH_{2n}, совпадающей с общей формулой циклоалканов. Простейшим алкеном является этилен (тривиальное название) или этен (систематическое название):



Систематические названия алкенов образуют путём изменения суффикса – **ан** соответствующего предельного углеводорода на суффикс – **ен**. При этом положение двойной связи указывают цифрой в конце названия. Например,

$CH_2 = CH_2$	$CH_2 = CH - CH_3$	$CH_2 = CH - CH_2 - CH_3$	$CH_3 - CH = CH - CH_3$
этен	пропен	бутен – 1	бутен – 2

$$\begin{array}{l} CH_3 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}} - CH = CH_2 \\ \text{3 – метилбутен – 1} \end{array}$$

На примере последнего соединения видно, что если в цепи молекулы присутствуют и кратная связь и заместитель, то нумерация углеродных атомов начинается с края, к которому ближе кратная связь.

Непредельные углеводороды, имеющие одну тройную связь, называются углеводородами ряда ацетилена или алкинами и описываются общей формулой C_nH_{2n-2}. Простейшим алкином является ацетилен (тривиальное название) или этин (систематическое название):

$$H - C \equiv C - H.$$

Систематические названия алкинов образуются заменой суффикса – **ан** соответствующего предельного углеводорода на суффикс – **ин**. Положение тройной связи указывают цифрой в конце названия. Например,

$$CH \equiv C–CH_2–CH_3 \qquad CH_3–C \equiv C–CH_3.$$

бутин – 1 *бутин – 2*

Непредельные углеводороды, имеющие две двойные связи, называются диеновыми углеводородами и описываются общей формулой C_nH_{2n-2}, совпадающей с общей формулой алкинов. Простейшим диеновым углеводородом является бутадиен – 1,3:

$$CH_2 = CH – CH = CH_2.$$

Систематические названия диеновых углеводородов образуются заменой суффикса **-ан** соответствующего предельного углеводорода на суффикс **-диен**. Положение двойных связей указывают цифрами в конце названия. Например,

$$CH_2 = CH–CH_2–CH = CH_2.$$

пентадиен – 1,4

Пространственное строение непредельных углеводородов.

В структурной формуле этилена две связи, соединяющие атомы углерода и обозначаемые одинаковыми чёрточками, на самом деле не эквивалентны друг другу.

В молекуле этилена, *также* как и в молекуле этана каждый атом углерода обладает 4-мя валентными электронами. Но в молекуле этилена в *отличие* от молекулы этана гибридизованы только три (один s и два p) электрона, образующих три sp^2 орбитали. Орбиталь четвёртого валентного p – электрона каждого углерода остаётся без изменений. Два из трёх гибридизованных sp^2 электрона образуют связь с атомами водорода, третий – с другим атомом углерода. Связь, образованная электронами углерода, вращающимися по гибридизованным sp^3, sp^2, sp орбиталям является σ – связью[25]. Оставшийся без изменений четвёртый p – электрон образует в молекуле этилена с аналогичным p – электроном другого атома вторую углерод – углеродную связь, которая называется π – связью[26]. Таким образом, двойная углерод – углеродная связь в молекуле этилена представляет собой совокупность одной σ и одной π связей (рис. 2.4).

[25] Особенность такой связи состоит в том, что она имеет только одну область перекрывания.

[26] π – связь отличается от σ – связи наличием двух областей перекрывания.

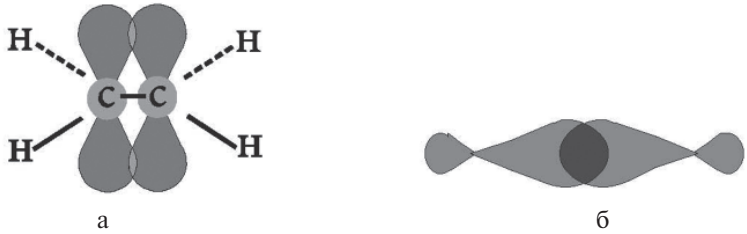


Рис. 2.4. Образование σ и π-связей в молекуле этилена. Перекрывание вертикальных орбиталей представляет собой π-связь (а). Плоскость, образуемая четырьмя атомами водорода перпендикулярна плоскости рисунка. Обозначение С–С символизирует в данном случае σ – связь, образованную перекрыванием sp^3 орбиталей атомов углерода (б)

Тройная связь в молекуле ацетилена представляет собой совокупность одной σ-связи и двух π-связей, расположенных перпендикулярно друг к другу.

В молекуле бутадиена двойные связи разделены одной ординарной связью. Но близость соседних π-связей приводит к тому, что центральные р-электроны частично перекрываются также между собой, хотя и в меньшей степени, чем с р-электронами крайних атомов (рис. 2.5).

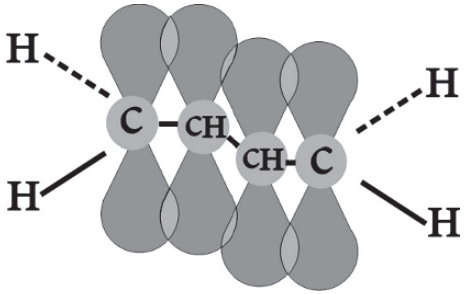


Рис. 2.5. Сопряжённые связи в молекуле бутадиена – 1,3. Плоскость, образованная четырьмя атомами углерода, перпендикулярна плоскости рисунка. На этой же плоскости расположены все атомы водорода

π-связи, разделённые между собой одной ординарной связью и перекрывающиеся вследствие близости взаиморасположения называются *сопряжёнными* π-связями. Следует подчеркнуть что в пентадиене – 1,4 такого сопряжения нет. π-Связь сравнительно легко разрывается, так как она значительно слабее σ-связи. Поэтому именно π-связь обеспечивает высокую реакционную способность непредельных углеводородов в реакциях соединения.

Физические свойства

Среди алкенов этен, пропен и бутен при нормальных условиях газообразны, от пентена C_5H_{10} до октадецена $C_{18}H_{36}$ включительно эти углеводороды находятся в жидком состоянии, а начиная с нонадецена $C_{19}H_{38}$ – в твёрдом. Среди ацетиленовых углеводородов газообразными при нормальных условиях являются только этин и пропин. 1,3 – Бутадиен при нормальных условиях – газ. Изменения физических свойств ненасыщенных углеводородов подчиняются тем же закономерностям, что и физические свойства насыщенных углеводородов: при увеличении молекулярной массы и разветвления углеводородов повышается температура их кипения.

Химические свойства

Реакции соединения. Для непредельных углеводородов реакции соединения являются наиболее характерными. Например, они легко обесцвечивают бромную воду:

$$H_2C = CH_2 + Br_2 \longrightarrow CH_2Br - CH_2Br$$

1,2 – дибромэтан

$$HC \equiv CH + Br_2 \longrightarrow CHBr = CHBr$$

1,2 – дибромэтен

$$CHBr = CHBr + Br_2 \longrightarrow CHBr_2 - CHBr_2$$

1,1,2,2 – тетрабромэтан

$$CH_2 = CH - CH = CH_2 + Br_2 \longrightarrow CH_2Br - CH = CH - CH_2Br$$

1, 4 – дибромбутен –2

присоединяют воду:

$$H_2C = CH_2 + HOH \xrightarrow{t,\ p,\ \text{катализатор}} CH_3 - CH_2OH$$

Этиловый спирт (Этанол) — реакция гидратации

$$H - C \equiv C - H + HOH \xrightarrow{HgSO_4} CH_3 - C(=O)H$$

уксусный альдегид (Этаналь) — реакция Кучерова

этилен способен присоединять даже кислород

$$2CH_2 = CH_2 + O_2 \xrightarrow{150 - 350^{\circ}C,\ \text{катализатор}} 2\ H_2C - CH_2$$

O

оксид этилена

Практически все непредельные углеводороды присоединяют галогеноводороды:

$$HC \equiv CH + HCl \longrightarrow CH_2 = CHCl$$

Винилхлорид
(Хлорэтен)

$$CH_2 = CH - CH = CH_2 + HCl \longrightarrow CH_3 - CH = CH - CH_2Cl$$

1-хлорбутен - 2

$$CH_2 = CH_2 + HCl \longrightarrow CH_3 - CH_2Cl$$

Этилхлорид
(Хлорэтан)

Порядок присоединения галогеноводорода к пропену и последующим углеводородам ряда эилена регламентируется правилом Марковникова:

Водород присоединяется к наиболее, а атом галогена к наименее гидрированному атому углерода:

$$CH_2 = CH - CH_3 + HBr \longrightarrow CH_3 - CHBr - CH_3.$$

2-бромпропан

Молекулы всех непредельных углеводородов способны соединяться друг с другом, образуя полимеры:

$$n\ CH_2 = CH_2 \xrightarrow{t,\ \text{катализатор}} (-\ CH_2 - CH_2 -)_n$$

этилен — полиэтилен

$$n\ HC \equiv CH \xrightarrow{t,\ \text{катализатор}} (\ -\ CH = CH -)_n$$

ацетилен — полиацетилен

$$n\ CH_2 = CH - CH = CH_2 \longrightarrow (-\ CH_2 - CH = CH - CH_2 -)_n$$

бутадиен – 1,3 — полибутадиен – 1,3

Реакция соединения многих одинаковых молекул в более крупные называется реакцией полимеризаци. Вещества, молекулы которых

представляют собой цепи, состоящие из множества повторяющихся звеньев, называются *полимерами*. Молекулы полимеров иногда называют *макромолекулами*. Исходные вещества при получении полимеров называются *мономерами*. То есть, мономером полиэтилена является этилен, мономером полиацетилена – ацетилен и т. д.

Реакции разложения. Без доступа воздуха, при повышенных температурах, непредельные углеводороды, также как и предельные могут образовывать углерод и водород:

$$C_nH_{2n} \longrightarrow nC + nH_2;$$

$$C_nH_{2n-2} \longrightarrow nC + (n-1)H_2.$$

Реакции замещения. В результате сгорания непредельных углеводородов происходит замещение атомов водорода и углерода атомами кислорода

$$C_2H_4 + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O;$$

$$2C_2H_2 + 5O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 2H_2O;$$

$$2CH_2 = CH - CH = CH_2 + 11O_2 \longrightarrow 8CO_2 + 6H_2O.$$

Реакции обмена. В силу того, что тройная связь в молекуле ацетилена весьма значительно стягивает на себя электроны, принадлежащие атомам водорода, то последние оказываются менее прочно связанными с молекулой по сравнению с атомами водорода этилена. Поэтому реакции обмена характерны, прежде всего, для углеводородов ацетиленового ряда с не более, чем одним заместителем:

$$HC \equiv CH + \underset{\text{амид натрия}}{NaNH_2} \longrightarrow \underset{\text{ацетиленид натрия}}{HC \equiv C - Na} + NH_3.$$

---

1. Составьте уравнения реакций соединения с водородом:

– этилена;

– ацетилена;

– бутадиена.

2. Дайте систематические названия следующим соединениям:

$$CH_3 - \underset{\underset{CH_3}{|}}{CH} - CH = CH - CH_3; \qquad CH \equiv C - \underset{\underset{CH_3}{|}}{CH} - CH_3; \qquad CH_2 = \underset{\underset{CH_3}{|}}{C} - CH = CH_2$$

3. Напишите структурные формулы следующих веществ:

2,3 – диметилпентен – 2; 3,4 – диметилгексин – 1; 2,4 – диметилпентадиен – 1,4

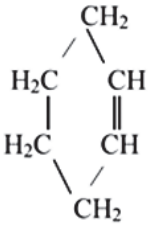
4. Какую Вы знаете особенность химических свойств алкинов, отличающую их от алкенов и алкадиенов?

5. Пользуясь равенствами (2.6) и (2.7) расставте коэффициенты в схеме реакции:

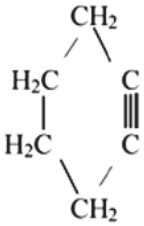
$$H_2C = CH_2 + KMnO_4 + H_2O \longrightarrow HO - CH_2 - CH_2 - OH + MnO_2 + KOH.$$

§ 2.1.8. Ароматические углеводороды (арены)

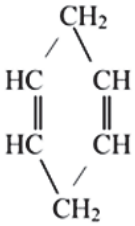
Молекулы непредельных углеводородов также как и предельных могут представлять собой замкнутые цепи – циклоалкены, циклоалкины, циклоалкадиены:



циклогексен



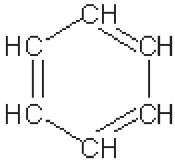
циклогексин



циклогексадиен – 1,4

Циклические углеводороды, содержащие в своём цикле *три* чередующиеся двойные связи называются ароматическими углеводородами.

Простейшим ароматическим углеводородом является бензол, описываемый молекулярной формулой C_6H_6:

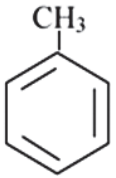


Радикал, полученный отщеплением одного атома водорода от молекулы бензола (C_6H_5–) называется фенилом:

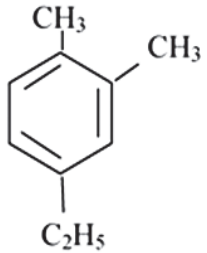
$$C_6H_5 – C_6H_5$$

дифенил

Согласно систематической номенклатуре все ароматические соединения рассматриваются как замещённые бензола и цифрами показывается место того или иного заместителя. Например,



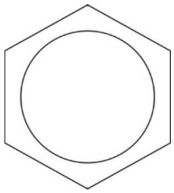
метилбензол



1,2 – диметил - 4 – этилбензол

Однако следует иметь в виду, что до сих пор нередко используются тривиальные названия ароматических углеводородов или используется другая номенклатура.

Также как и в бутадиене – 1,3 двойные связи бензола сопряжены, а атомы углерода обладают sp^2 – гибридизацией своих орбиталей. Но, в отличие от бутадиена – 1,3, сопряжение в бензоле приводит к *равному* перекрыванию орбитали каждого p – электрона соседними p-электронами. То есть, фактически в молекуле бензола вместо чередования двойных и ординарных связей, атомы углерода объединены единой π – системой шести p – электронов, расположенной перпендикулярно плоскости шести σ – связей. Чтобы подчеркнуть равенство всех углерод-углеродных связей в молекуле бензола, его структурную формулу часто представляют следующим образом:



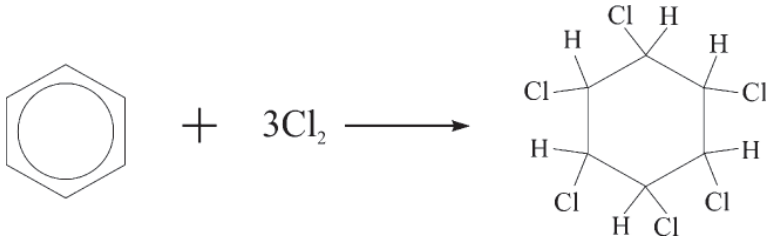
Каждый угол такого шестиугольника символизирует $\overset{\overset{\displaystyle H}{|}}{C}$, т.е. углерод и водород, объединённые σ-связью.

Физические свойства

Бензол – бесцветная, нерастворимая в воде жидкость со своеобразным запахом. Его температура кипения 80,1 °С. При охлаждении он легко застывает в белую кристаллическую массу с температурой плавления 5,5 °С. Температуры кипения ароматических углеводородов закономерно повышаются с увеличением их молекулярных масс.

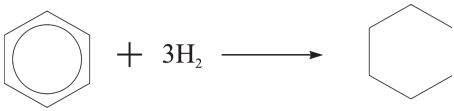
Химические свойства

Реакции соединения. Бензол присоединяет галогены под действием солнечного света или ультрафиолетовых лучей:



гексахлорциклогексан

При нагревании и в присутствии катализаторов бензол присоединяет водород:



Реакции разложения. При нагревании без доступа воздуха бензол, как и все углеводороды может распадаться на углерод и водород:

$$C_6H_6 \longrightarrow 6C + 3H_2.$$

Реакции замещения. Атомы водорода в бензоле замещаются галогенами в присутствии катализатора – солей железа (III):

$$C_6H_6 + Br_2 \xrightarrow{FeCl_3} C_6H_5Br + HBr.$$

Обратите внимание: в отсутствие катализатора между бензолом и галогенами протекает реакция соединения, а в присутствии катализатора – реакция замещения.

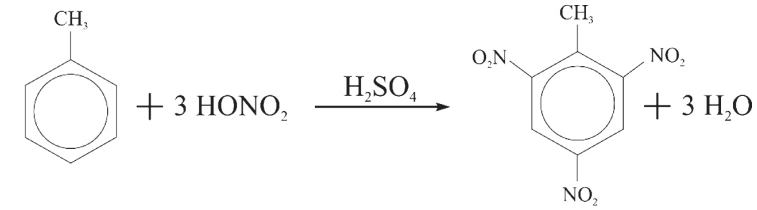
Бензол и его гомологи горят на воздухе коптящим пламенем:

$$2C_6H_6 + 15O_2 \longrightarrow 12CO_2 + 6H_2O.$$

Реакции обмена. При нагревании, в присутствии серной кислоты, бензол взаимодействует с азотной кислотой

$$C_6H_6 + HONO_2 \xrightarrow{H_2SO_4} \underset{\textit{Нитробензол}}{C_6H_5NO_2} + H_2O.$$

Ещё легче в реакцию обмена с азотной кислотой вступают гомологи бензола, например толуол $C_6H_5CH_3$:



толуол
(метилбензол)

1 - метил - 2,4,6 - тринитробензол

Пример решения задачи

К 39 г. бензола в присутствии хлорида железа (III) добавили 1 моль брома. Какие вещества и сколько граммов их получилось после реакции?

Прежде чем приступить к количественным расчётам, необходимо записать уравнение реакции:

$$\begin{array}{ccccc} 39\text{ г.} & 1\text{ моль} & m(C_6H_5Br) & m(HBr) & \\ C_6H_6 & + Br_2 & \longrightarrow C_6H_5Br & + HBr, & \\ 78\text{ г/моль} & 160\text{ г/моль} & 157\text{ г/моль} & 81\text{ г/моль} & \end{array}$$

из которого видно, что продуктами взаимодействия являются бромбензол и бромоводород.

Дано:	*Решение:*
$m(C_6H_6) = 39$ г $n(Br_2) = 1$ моль	Для взаимодействия с 39 г. бензола необходимо только 0,5 моль брома. Действительно, согласно следствия закона эквивалентов:
$m(C_6H_5Br)$ – ? $m(HBr)$ – ?	$$\frac{m(C_6H_6)}{M(C_6H_6)} = n(Br_2).$$

В данном случае

$$n(Br_2) = \frac{39}{78} = 0,5\,(\text{моль}).$$

То есть, Br_2 взят в избытке. Полностью прореагирует только бензол, взятый в недостатке.

1 способ
окончания решения задачи
(с помощью следствия закона эквивалентов)

Для пары веществ – бензол и бромбензол – следствие закона эквивалентов запишется следующим образом:

$$\frac{m(C_6H_6)}{M(C_6H_6)} = \frac{m(C_6H_5Br)}{M(C_6H_5Br)},$$

откуда

$$m(C_6H_5Br) = \frac{m(C_6H_6) \cdot M(C_6H_5Br)}{M(C_6H_6)},$$

то есть

$$m(C_6H_5Br) = \frac{39 \cdot 157}{78}$$

или

$$\boxed{m(C_6H_5Br) = 78{,}5 \text{ г}}$$

для пары – бензол и бромоводород:

$$\frac{m(C_6H_6)}{M(C_6H_6)} = \frac{m(HBr)}{M(HBr)},$$

откуда

$$m(HBr) = \frac{m(C_6H_6) \cdot M(HBr)}{M(C_6H_6)},$$

то есть

$$m(HBr) = \frac{39 \cdot 81}{78}$$

или

$$\boxed{m(HBr) = 40{,}5 \text{ г.}}$$

2 способ
окончания решения задачи
(по правилам составления пропорций)

На основании уравнения реакции можно составить следующие пропорции:

$$\frac{m\left(C_6H_6\right)}{m\left(C_6H_5Br\right)} = \frac{M\left(C_6H_6\right)}{M\left(C_6H_5Br\right)};$$

$$\frac{m\left(C_6H_6\right)}{m(HBr)} = \frac{M\left(C_6H_6\right)}{M(HBr)},$$

откуда

$$m\left(C_6H_5Br\right) = \frac{m\left(C_6H_6\right)\cdot M\left(C_6H_5Br\right)}{M\left(C_6H_6\right)};$$

$$m(HBr) = \frac{m\left(C_6H_6\right)\cdot M(HBr)}{M\left(C_6H_6\right)},$$

то есть

$$m\left(C_6H_5Br\right) = \frac{39\cdot 157}{78};$$

$$m(HBr) = \frac{39\cdot 81}{78}$$

или

$$\boxed{m\ (C_6H_5Br) = 78{,}5\ \text{г};}$$

$$\boxed{m(HBr) = 40{,}5\ \text{г}.}$$

3 способ
окончания решения задачи
(с помощью логических заключений)

По условию задачи прореагировало 0,5 моль бензола:

$$n\left(C_6H_6\right) = \frac{m\left(C_6H_6\right)}{M\left(C_6H_6\right)} = \frac{39}{78} = 0{,}5\left(\text{моль}\right).$$

Из уравнения реакции слеует, что при взаимодействии 0,5 моль C_6H_6 образуется 0,5 моль C_6H_5Br и 0,5 моль HBr. То есть

$$m(C_6H_5Br) = M(C_6H_5Br)\cdot 0{,}5 = 157\cdot 0{,}5 = 78{,}5\ (г);$$

$$m(HBr) = M(HBr)\cdot 0{,}5 = 81\cdot 0{,}5 = 40{,}5\ (г);$$

Ответ: $m(C_6H_5Br) = 78{,}5$ г, $m(HBr) = 40{,}5$ г.

Задачи для самостоятельного решения.

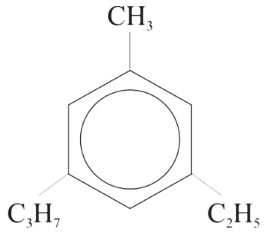
1. Газообразную смесь из 1 моль бензола и 142 г. хлора подвергли ультрафиолетовому облучению. Какой продукт, и какой массы при этом образовался? Решить задачу тремя способами.

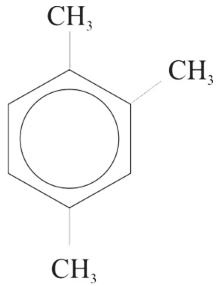
2. Определить количество бензола, израсходованного на образование 369 г. нитробензола.

---

1. В чём состоит особенность строения бензола, отличающая его от неароматических углеводородов?

2. Дайте систематические названия следующим соединениям:





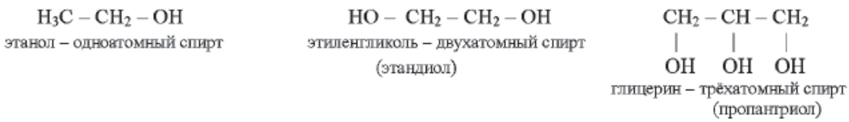
3. Охарактеризуйте химические свойства ароматических углеводородов на примере конкретных реакций.

§ 2.1.9. Кислородсодержащие органические соединения

Органические вещества, молекулы которых включают, помимо углерода и водорода другие элементы периодической системы называют производными углеводородов.

Производные углеводородов, содержащие в своих молекулах кислород, называют кислородсодержащими органическими соединениями. Представителями кислородсодержащих органических соединений являются: *спирты, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты* и некоторые другие вещества.

Спиртами называются производные углеводородов, в молекулах которых один или несколько атомов водорода замещены функциональными гидроксогруппами. Если гидроксогруппой замещён один атом водорода, то спирт называется одноатомным, если два и более атомов водорода, то многоатомным. Например:



Важно подчеркнуть, что при одном и том же атоме углерода не может находиться более одной гидроксогруппы.

Систематические названия спиртов производятся добавлением суффикса **-ол** к названию соответствующего углеводорода и при необходимости указанием номера атома углерода, при котором находится группа –OH:

$$CH_3–COH–CH_3.$$

пропанол-2

Спирты, в отличие от неорганических оснований, при растворении в воде не диссоциируют и не образуют аниона OH^-.

Альдегидами называются производные углеводородов, содержащие альдегидную функциональную группу:

```
    O
   //
 – C
    \
     H
```

например,

```
      O                O                        O
     //               //                       //
H – C          H3C – C           H3C – CH2 – C
     \                \                        \
      H                H                        H
```

муравьиный альдегид (метаналь) *уксусный альдегид (этаналь)* *пропионовый альдегид альдегид (пропаналь)*

Систематические названия альдегидов производятся добавлением суффикса – **аль** к названию соответствующего углеводорода.

Кетонами называются производные углеводородов, содержащие карбонильную группу

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-$$

соединённую с двумя углеводородными радикалами. Например,

$$H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-CH_3$$

ацетон
или диметилкетон
(пропанон)

$$H_3C-CH_2-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-CH_3$$

метилэтилкетон
(бутанон)

$$H_3C-CH_2-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-CH_2-CH_3$$

диэтилкетон
(пентанон–3)

Систематические названия кетонов производятся добавлением суффикса **-он** к названию соответствующего углеводорода и при необходимости указанием номера атома углерода, при котором находится карбонильная группа.

Карбоновыми кислотами называются производные углеводородов, содержащие *карбоксильную функциональную группу:*

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}\diagdown OH$$

например:

$$H-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}\diagdown OH$$

муравьиная кислота
(метановая)

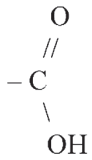
$$H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}\diagdown OH$$

уксусная кислота
(этановая)

$$H_3C-CH_2-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}\diagdown OH$$

пропионовая кислота
(пропановая)

Следует подчеркнуть, что фрагмент



рассматривается в органической химии в качестве единой функциональной карбоксильной группы, хотя формально состоит из двух групп – карбонильной и гидроксогруппы.

Карбоновые кислоты, включающие в свой состав кратные углерод-углеродные связи называются *непредельными* кислотами[27], например:

$CH_2{=}CH{-}COOH$	$CH_2{=}CH{-}CH_2{-}COOH$	$CH_3{-}CH{=}CH{-}COOH$
акриловая кислота (пропеновая)	*винилуксусная кислота (бутен-3-овая)*	*кротоновая кислота (бутен-2-овая)*

Непредельные кислоты относятся к органическим *соединениям со смешанными функциями*, то есть, включающими *различные* функциональные группы.

Систематические названия карбоновых кислот производятся добавлением окончания **-овая** к названию соответствующего углеводорода и слова «кислота».

Карбоновые кислоты, подобно неорганическим кислотам, при растворении в воде диссоциируют, отщепляя катион H^+:

$$CH_3COOH \rightleftharpoons CH_3COO^- + H^+.$$

Физические свойства

Даже низшие спирты – метанол и этанол являются жидкостями при нормальных условиях, в то время как соответствующие углеводороды представляют собой газы. Низшие альдегиды, кетоны и кислоты также являются жидкостями за исключением метаналя, который кипит при –21 °С. Такое агрегатное состояние кислородсодержащих органических

[27] Метановая, этановая и пропановая кислоты относятся к предельным кислотам

соединений объясняется наличием водородных связей[28] между молекулами веществ, объединяющих эти молекулы в одно единое целое.

```
C2H5 – O        C2H5
         |        |
         H . . . O
                  |
                  H
```

Хотя водородные связи намного слабее ионных и ковалентных связей, однако, их прочность достаточна для того, чтобы существенно влиять на агрегатное состояние веществ.

Химические свойства

Реакции соединения. Присоединение к органической молекуле возможно только в том случае, если она содержит двойную или тройную связь, включающую в себя непрочную, легко разрывающуюся π-связь.

```
          O
          //
H3C – C  + H2 ——— t, катализатор ———→ H3C – CH2 – OH
          \
           H
```

```
          O
          //
H3C – C – CH3 + H2 ——— t, катализатор ———→ CH3 – HCOH – CH3
```

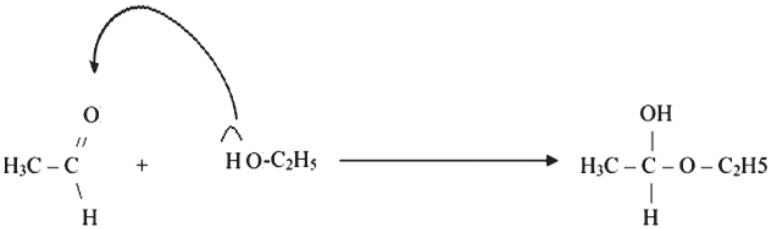
[28] Водородная связь представляет собой невалентное взаимодействие, обозначаемое тремя точками, например A – H ... B, где B – атом, имеющий неподелённую электронную пару (N, O, S), A – атом, соединённый с водородом ковалентной связью. Это взаимодействие сводится к тому, что электрон атома водорода, смещаясь в сторону атома A, предоставляет свою, частично освобождающуюся орбиталь для пары электронов другой молекулы B. Многие физические свойства воды обусловлены именно водородной связью.

```
H          O          H
  \       /  \       /
   O . . . H   H . . . O
  /                   \
 H                     H
```

В этом случае A ≡ B ≡ O.

Аналогично присоединяют водород и другие альдегиды и кетоны. Однако, для карбоновых кислот реакции присоединения водорода не характерны.

Кроме того, альдегиды способны соединяться со спиртами, образуя полуацетали:



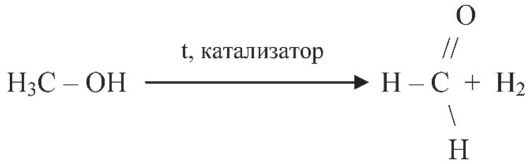
(2.20)

этилполуацеталь этаналя

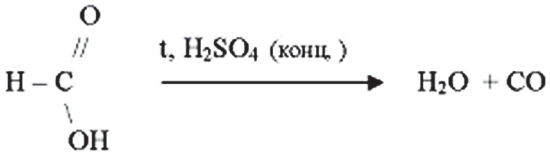
Реакции разложения. При нагревании до температуры 140 °C и в присутствии концентрированной серной кислоты многие одноатомные спирты образуют алкены, отщепляя воду (реакция дегидратации):

$$H_3C-CH_2-OH \xrightarrow{t,\ H_2SO_4\ (\text{конц.})} CH_2=CH_2+H_2O.$$

Метанол в результате отщепления водорода (реакция дегидрирования) может образовать метаналь



Муравьиная кислота при нагревании и в присутствии концентрированной серной кислоты разлагается на воду и угарный газ



Реакции замещения. Подобно воде спирты реагируют с активными металлами

$$2H_3C-CH_2-OH+2Na \longrightarrow 2H_3C-CH_2-ONa+H_2.$$

этилат натрия

Благодаря наличию углеводородного радикала кислородсодержащие органические соединения могут вступать в реакции замещения с галогенами подобно алканам:

$$CH_3COOH + Cl_2 \longrightarrow ClCH_2COOH + HCl.$$

хлоруксусная кислота

Реакции обмена. Спирты взаимодействуют с кислотми.

$$H_3C-CH_2OH + HCl \rightleftarrows H_3C-CH_2Cl + H_2O$$

этилхлорид

$$\begin{array}{l} CH_2-CH-CH_2 \\ | \quad\quad | \quad\quad | \\ OH \quad OH \quad OH \end{array} + \begin{array}{l} H-O-NO_2 \\ H-O-NO_2 \\ H-O-NO_2 \end{array} \rightleftarrows \begin{array}{l} CH_2-O-NO_2 \\ | \\ CH-O-NO_2 \\ | \\ CH_2-O-NO_2 \end{array} + 3H_2O \quad (2.21)$$

нитроглицерин

$$H_3C-CH_2OH + C(=O)-CH_3 \rightleftarrows C(=O)-CH_3 + H_2O$$

$$HO \quad\quad\quad H_3C-CH_2-O$$

Обратите внимание, что механизм взаимодействия спиртов с карбоновой кислотой существенно отличается от механизма взаимодействия с неорганическими кислотами. Для образования воды карбоновая кислота предоставляет гидроксогруппу, в то время как неорганические кислоты предоставляют атомы водорода.

Реакции взаимодействия спиртов с карбоновыми кислотами называются *реакциями этерификации* (от лат. ester – эфир). Органические продукты реакции этерификации называются *сложными эфирами*.

Сложные эфиры, образованные в результате этерификации *глицерина* и карбоновых кислот называются жирами:

$$\begin{array}{l} CH_2-OH \\ | \\ CH-OH \\ | \\ CH_2-OH \end{array} + \begin{array}{l} HO-C(=O)-R_1 \\ HO-C(=O)-R_2 \\ HO-C(=O)-R_3 \end{array} \rightleftarrows \begin{array}{l} CH_2-O-C(=O)-R_1 \\ | \\ CH-O-C(=O)-R_2 \\ | \\ CH_2-O-C(=O)-R_3 \end{array} + 3H_2O$$

где R_1 R_2 R_3 – различные углеводородные радикалы – насыщенные и ненасыщенные.

Процесс, обратный этерификации глицерина, называется гидролизом жиров. Природные жиры[29], входящие в состав клеток растений и животных включают R_1, R_2 и R_3, содержащие от 3 до 25 атомов углерода. При гидролизе твёрдых природных жиров образуются только предельные карбоновые кислоты, наиболее распространёнными из которых являются пальмитиновая и стеариновая:

$C_{15}H_{31}COOH$	$C_{17}H_{35}COOH$
пальмитиновая кислота	стеариновая кислота

Кислоты с такими длинными углеводородными радикалами иногда относят к *высшим жирным кислотам*[30].

При гидролизе жидких (преимущественно растительных) природных жиров образуются главным образом непредельные карбоновые кислоты, наиболее распространёнными из которых являются олеиновая, линолевая и линоленовая кислоты:

$C_{17}H_{33}COOH$	$C_{17}H_{31}COOH$	$C_{17}H_{29}COOH$
олеиновая кислота	*линолевая кислота*	*линоленовая кислота*

молекулы спирта могут взаимодействовать и друг с другом

$$H_3C-CH_2OH + HOH_2C-CH_3 \longrightarrow \underset{\textit{диэтиловый эфир}}{H_3C-CH_2-O-H_2C-CH_3} + H_2O; \quad (2.22)$$

$$H_3C-CH_2OH + HO-CH_3 \longrightarrow \underset{\textit{метилэтиловый эфир}}{H_3C-CH_2-O-CH_3} + H_2O. \quad (2.23)$$

Органические продукты взаимодействия молекул спирта друг с другом называются *простыми эфирами*.

Причём, дегидратация спирта, протекающая с образованием простого эфира проводится в аналогичных условиях, что и дегидратация спирта, протекающая с образованием алкена, но при меньшей температуре и большей концентрации спирта.

---

[29] Природные жиры относятся к *липидам* – обширной группе природных органических соединений, включающей жиры и жироподобные вещества.

[30] Термин «жирный» означает, что соединение ациклическое. Возник из-за того, что впервые природные карбоновые кислоты были выделены из жиров.

Взаимодействие альдегидов с аммиачным раствором оксида серебра до сих пор считается классической качественной реакцией, доказывающей наличие группы

$$-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{C}\diagdown H$$

в молекуле вещества. Реакция очень эффектна, так как выделяющееся в результате серебро покрывает стенки реакционной пробирки, делая её поверхность зеркальной, отчего сам процесс называют реакцией «серебряного зеркала». Проводят его в две стадии:

1. Растворяют оксид серебра в водном растворе аммиака

$$Ag_2O + 4NH_3 + H_2O \longrightarrow 2\left[Ag\left(NH_3\right)_2\right]OH.$$

2. К полученному раствору добавляют альдегид и нагревают:

$$H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{C}\diagdown H + 2\,[Ag(NH_3)_2]OH \longrightarrow H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{C}\diagdown OH + 4NH_3 + H_2O + 2Ag\downarrow$$

Если уравнения обеих стадий сложить, то суммарная схема процесса окажется следующей:

$$H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{C}\diagdown H + Ag_2O \longrightarrow H_3C-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{C}\diagdown OH + 2Ag\downarrow$$

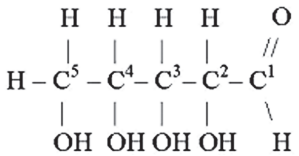
Однако, следует иметь в виду, что в реакцию «серебряного зеркала» вступает и метановая кислота,

$$HCOOH + Ag_2O \longrightarrow H_2CO_3 + 2Ag\downarrow$$

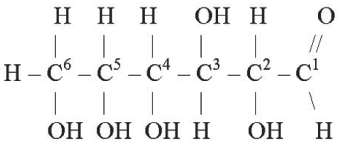
$$H_2CO_3 \rightarrow H_2O,\quad H_2CO_3 \rightarrow CO_2$$

К кислородсодержащим органическим соединениям со смешанными функциями, помимо непредельных кислот, относятся также

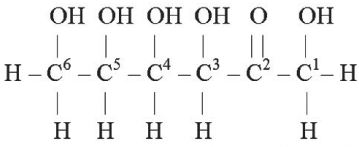
углеводы – вещества, химический состав которых может быть представлен формулой $C_n(H_2O)_m$, например:



рибоза $C_5H_{10}O_5$ ($C_5(H_2O)_5$)



глюкоза $C_6H_{12}O_6$ ($C_6(H_2O)_6$)



фруктоза $C_6H_{12}O_6$ ($C_6(H_2O)_6$)

Однако, известно, что альдегиды способны вступать в реакцию присоединения со спиртами (см. реакцию (2.20)). Поскольку в приведённых примерах альдегидная группа и гидроксогруппа находятся при одной молекуле, то они могут соединяться, образуя замкнутый цикл. В водных растворах рибозы альдегидная группа соединяется с гидроксогруппой четвёртого атома углерода. В водных растворах глюкозы с гидроксогруппой пятого атома углерода. В водных растворах фруктозы может происходить соединение карбонильной группы с шестым атомом углерода или с пятым. То есть, в этих условиях существуют обе формы молекул углеводов – циклическая и ациклическая. Но равновесие между ними смещено, всё-таки, в сторону циклических форм. Углеводы, циклическая форма молекул которых представляет собой один цикл, называются *моносахаридами*.

Подобно спиртам циклические формы молекул углеводов могут вступать в реакцию обмена между собой (см. реакции (2.22) и (2.23)), образуя углеводы с большей молекулярной массой. Например:

$$\underset{\text{глюкоза}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{фруктоза}}{C_6H_{12}O_6} \longrightarrow \underset{\substack{\text{сахароза} \\ (C_{12}(H_2O)_{11})}}{C_{12}H_{22}O_{11}} + H_2O$$

дисахарид

Более того, поскольку углеводы содержат несколько гидроксогрупп, то они способны соединяться друг с другом многократно, образуя макромолекулы с огромной молекулярной массой. Например,

$$\underset{\text{глюкоза}}{n\,C_6H_{12}O_6} \longrightarrow \underset{\text{крахмал}}{(-\,C_6H_{10}O_5\,-)_n} + n\,H_2O$$

$$(C_6(H_2O)_5)_n$$

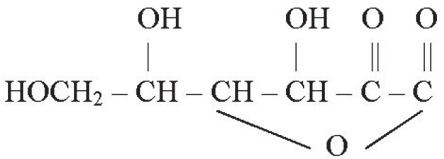
или (при других условиях процесса)

$$\underset{\text{глюкоза}}{m\,C_6H_{12}O_6} \longrightarrow \underset{\text{целлюлоза}}{(-\,C_6H_{10}O_5\,-)_m} + m\,H_2O$$

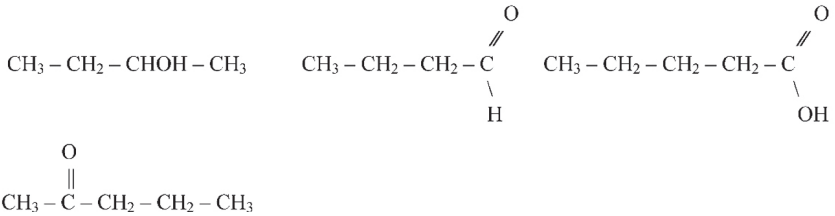
$$(C_6(H_2O)_5)_m$$

Таким образом, крахмал и целлюлоза представляют собой полимеры (полисахариды), мономером которых является глюкоза. Но целлюлоза отличается значительно бóльшим значением молекулярной массы ($m >> n$) и отсутствием разветвлений в цепи, характерных для молекул крахмала. Очень близок к крахмалу *гликоген* (животный крахмал), который откладывается в печени и является резервным веществом в организме человека и животных. Но молекулы гликогена значительно крупнее молекул крахмала и имеют ещё более разветвлённую структуру.

Некоторые витамины – жизненно важные компоненты живых организмов – также относятся к кислородсодержащим соединениям со смешанными функциями. В частности, витамин С (аскорбиновая кислота) представляет собой циклический эфир, содержащий карбонильную и гидроксогруппы:



1. Дайте систематические названия следующим соединениям:



2. Охарактеризуйте химические свойства кислородсодержащих органических соединений, не являющихся углеводами. Что такое жиры? В чём состоит основное отличие химического состава жидких жиров от твёрдых жиров. Опишите реакцию серебряного зеркала.

3. Дайте определения следующим понятиям: углеводы, моносахариды, полисахариды. Приведите примеры этих веществ. Опишите разницу в строении молекул целлюлозы, крахмала и гликогена.

4. Пользуясь равенствами (2.6) и (2.7) расставьте коэффициенты в схеме реакции:

$$C_6H_5-CH_3 + KMnO_4 + H_2SO_4 \longrightarrow C_6H_5-\overset{\overset{\displaystyle O}{//}}{\underset{\underset{\displaystyle OH}{\backslash}}{C}} + MnSO_4 + K_2SO_4 + H_2O$$

§ 2.1.10. Азотсодержащие органические соединения

Производные углеводородов, содержащие в своих молекулах азот, называются азотсодержащими органическими соединениями.

Азотсодержащие органические, содержащие функциональную группу:

$$-\overset{\overset{\displaystyle R_1}{/}}{\underset{\underset{\displaystyle R_2}{\backslash}}{N}}$$

где R_1 и R_2 – углеводородные радикалы или водород, называются аминами. Группа $-NH_2$ называется амногруппой.

CH_3-NH_2	$\overset{\overset{\displaystyle H_3C}{\backslash}}{\underset{\underset{\displaystyle H_3C}{/}}{NH}}$	$\overset{\overset{\displaystyle H_3C}{\backslash}}{\underset{\underset{\displaystyle H_3C}{/}}{H_3C-N}}$	$\overset{\overset{\displaystyle H_5C_2}{\backslash}}{\underset{\underset{\displaystyle H_3C}{/}}{NH}}$	$C_6H_5-NH_2$
метиламин	диметиламин	триметиламин	метилэтиламин	фениламин (анилин)

Благодаря тому, что атом азота содержит неподелённую пару электронов, все амины, также как и аммиак легко вступают в реакцию соединения с протонами:

$$H_3N: + H^+ \longrightarrow [NH_4]^+$$

$$CH_3-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{N}}: + H^+ \longrightarrow [CH_3-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{N}}:H]^+$$

Причём, это взаимодействие настолько активно, что протоны «отбираются» у молекул воды и в растворе накапливается избыток анионов OH^-, то есть, среда становится основной:

$$H_3N: + H_2O \longrightarrow [NH_4]^+ + OH^-$$

$$CH_3-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{N}}: + H_2O \longrightarrow [CH_3-NH_3]^+ + OH^-$$

Поэтому амины считаются основаниями. При взаимодействии с неорганическими кислотами они образуют соли

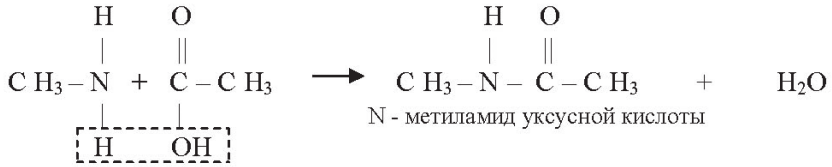
$$[CH_3-NH_3]Cl \rightleftarrows [CH_3-NH_3]^+ + Cl^-$$

хлорид метиламмония

которые в воде диссоциируют на ионы

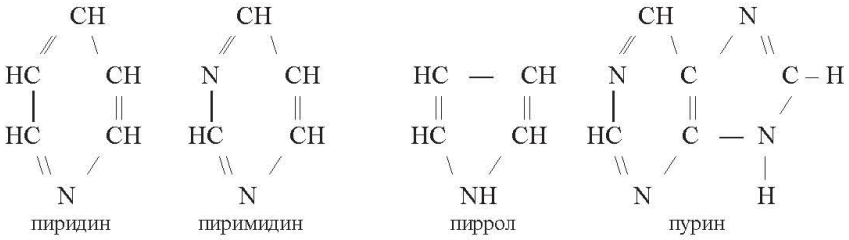
$$CH_3-\underset{\underset{H}{|}}{\overset{\overset{H}{|}}{N}}: + HCl \longrightarrow [CH_3-NH_3]Cl$$

Однако, взаимодействуя с *карбоновыми* кислотами, амины ведут себя подобно спиртам в реакциях этерификации (реакция (2.21)), то есть, вступают в реакцию обмена, предоставляя для образования воды атом водорода:



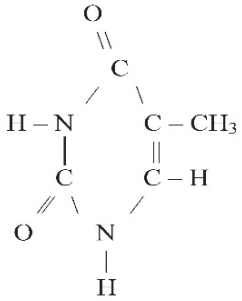
Образующийся при этом фрагмент $-\overset{\overset{\displaystyle H}{|}}{N}-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-$ называется *пептидной* или *амидной* группой, а связь между атомами углерода и азота в этой группе – *пептидной* или *амидной* связью.

Кроме того, азотсодержащие вещества способны образовывать гетероциклические соединения (гетероциклы). Гетероциклическими называются такие циклические соединения, в циклах которых наряду с атомами углерода и водорода содержатся также атомы других элементов. Например, пиридин, пиримидин, пиррол и пурин являются азотсодержащими гетероциклами, проявляющими примерно такие же основные свойства, как и амины:

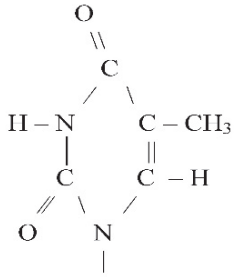


Важнейшими производными пиримидина являются *тимин, урацил* и *цитозин* – азотистые основания, радикалы которых входят в состав

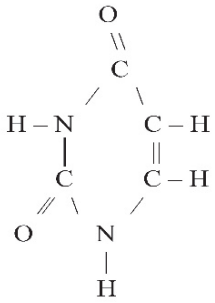
нуклеиновых кислот, являющихся неотъемлемыми компонентами клеток любого живого организма:



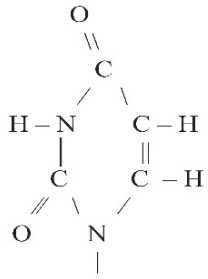
тимин



тимил

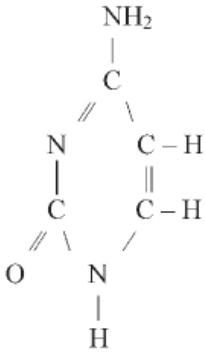


урацил

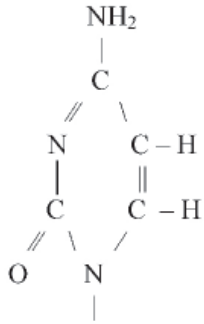


радикал урацила

Помимо этого в состав нуклеиновых кислот входят также радикалы аденина (аденил) и гуанина (гуанил), являющиеся производными пурина:



цитозин



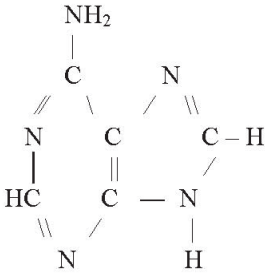
цитозил

Представителями нуклеиновых кислот являются рибонуклеиновые кислоты (РНК), в частности, информационные (матричные) рибонуклеиновые кислоты (м-РНК), на которых и происходит синтез белков в организме. А также дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК).

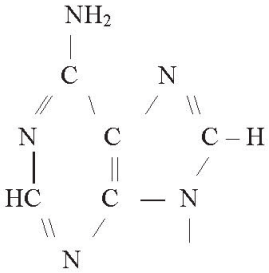
1. Приведите структурные формулы аминов, которые Вы знаете. Дайте им названия.

2. Дайте определения следующим понятиям: пептидная группа и пептидная связь. Приведите пример образования пептидной связи.

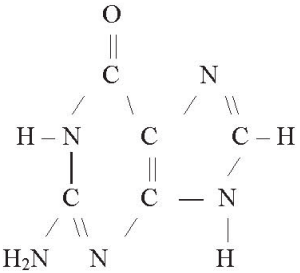
3. Какая из приведённых ниже формул представляет собой: аденин, урацил, гуанин, тимин, цитозин?



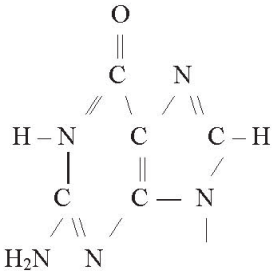
аденин



аденил



гуанин



гуанил

§ 2.1.11. Аминокислоты. Белки. Нуклеиновые кислоты

Аминокислотами называются органические соединения, содержащие аминогруппу и карбоксильную группу. Например:

$$CH_2-COOH$$
$$|$$
$$NH_2$$

аминоэтановая кислота,
глицин

$$H_3C-CH-COOH$$
$$|$$
$$NH_2$$

2-амнопропановая кислота
(α-амнопропановая кислота)
аланин

$$CH_3-CH-CH_2-COOH$$
$$|$$
$$NH_2$$

3-аминобутановая кислота
(β-аминобутановая кислота)

$$CH_2-CH_2-CH_2-COOH$$
$$|$$
$$NH_2$$

4-аминобутановая кислота
(γ-аминобутановая кислота)

Аминокислоты относятся к веществам со смешанными функциями. Кроме того, они являются азотсодержащими и кислородсодержащими одновременно. Некоторые природные аминокислоты содержат также серу, как, например, цистеин:

$$HS-CH_2-CH-COOH$$
$$|$$
$$NH_2$$

цистеин

Наиболее характерным химическим свойством аминокислот является способность аминогруппы одной молекулы вступать в реакцию замещения с карбоксильной группой другой молекулы:

$$HOOC-CH_2-\overset{\overset{H}{|}}{N} + \underset{\underset{OH}{|}}{\overset{\overset{O}{\|}}{C}}-\overset{\overset{NH_2}{|}}{CH}-H_3C \longrightarrow HOOC-CH_2-\overset{\overset{H}{|}}{N}-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-\overset{\overset{NH_2}{|}}{CH}-H_3C + H_2O$$

В результате образуется новая аминокислота, но уже с пептидной связью, способная взаимодействовать со следующей молекулой аминокислоты и образовать ещё одну пептидную связь. Последовательное увеличение количества пептидных связей в одной молекуле приводит к образованию полимеров, которые называются полипептидами, важнейшими представителями которых являются белки.

Белки – важнейшая составная часть клеток живых организмов – представляют собой полипептиды, составленные взаимодействием различных ***α-аминокислот***. Таким образом, белки можно рассматривать как полимеры, мономером которых являются α-аминокислоты. Молекулярные массы природных белков колеблются от нескольких десятков тысяч до нескольких сот тысяч а.е.м. Аминокислотные остатки, являющиеся звеньями полипептида называют аминокислотными звеньями. Последовательность аминокислотных звеньев в линейной полипептидной цепи называется *первичной структурой* белковой молекулы (рис. 2.6).

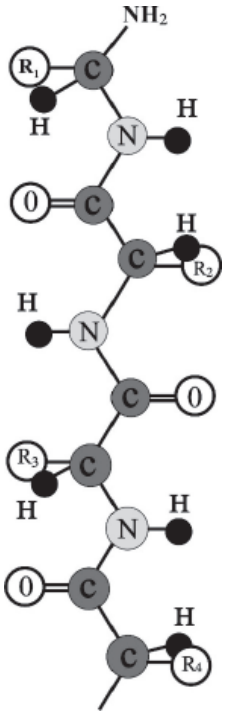


Рис. 2.6. Первичная структура белков.
R_1, R_2, R_3, R_4 – радикалы остатков аминокислот

Благодаря многочисленным *водородным связям* между группами –CO– и –NH– первичная структура белков свёртывается в спираль, которая называется *вторичной структурой* белковой молекулы (рис. 2.7).

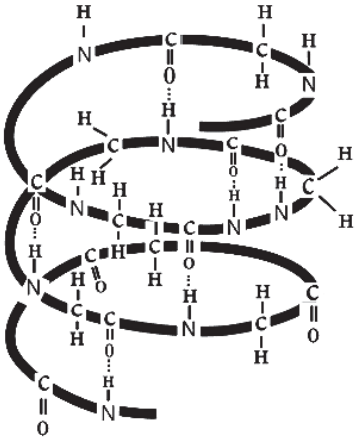


Рис. 2.7. Вторичная структура белков

В свою очередь, вторичная структура также способна свернуться, образовав *третичную структуру* (рис. 2.8).

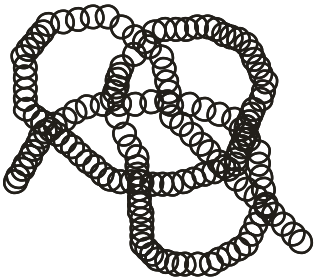
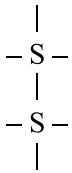


Рис. 2.8. Третичная структура белков

Третичная структура поддерживается уже не только водородными связями, но также и ковалентными. В частности между атомами серы различных участков полипептида часто образуется дисульфидный мостик



Некоторые белковые макромолекулы могут соединяться друг с другом, образуя относительно крупные агрегаты. Подобные полимерные образования белков называются *четвертичными структурами*. Примером такого белка является гемоглобин, который представляет комплекс из четырёх макромолекул (рис. 2.9). Оказывается, что только при такой структуре гемоглобин способен присоединять и транспортировать кислород в организме.

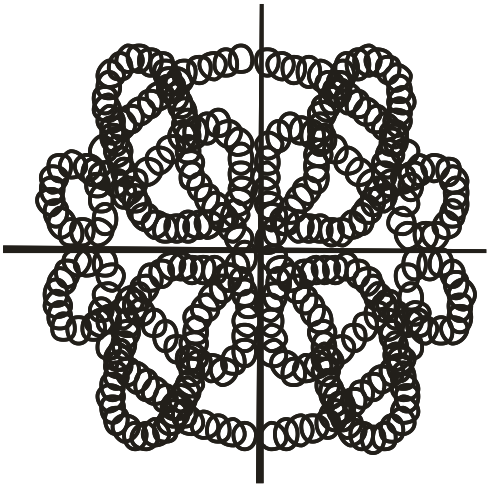


Рис. 2.9. Четвертичная структура белков

Нуклеиновыми кислотами (полинуклеотидами) называют высокомолекулярные органические соединения, повторяющимся звеном которых являются *нуклеотиды* состоящие из

1. Остатка фосфорной кислоты – HPO_3 –

2. Остатка рибозы – $C_5H_7O_3$ – или дезоксирибозы – $C_5H_7O_2$ –

3. Радикалов азотистых оснований, а именно таких как: аденин, тимин, гуанин, цитозин, урацил.

Например, если радикал урацила обозначить У, то молекулярную формулу одного из нуклеотидов можно представить следующим образом:

$$-HPO_3-C_5H_7O_3-$$
$$\quad\quad\quad\quad\quad\quad |$$
$$\quad\quad\quad\quad\quad\quad У$$

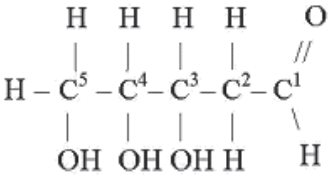
К нуклеиновым кислотам относятся рибонуклеиновые кислоты (РНК) и дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК). **Рибонуклеиновые кислоты** – это полинуклеотиды, включающие в себя остаток рибозы, радикалы аденина, гуанина, цитозина и урацила. Поскольку различные нуклеотиды РНК отличаются только радикалами азотистых оснований, то нередко каждый нуклеотид обозначают прописной первой буквой названия этого нуклеотида. Поэтому фрагмент какой либо РНК можно представить так

–А–У–А–Г–У–Ц–У–А–Ц–А–У–У–Ц–А–У–Ц–Ц–У–...

Первичная структура молекулы белка, синтезируемого на информационной (матричной) рибонуклеиновой кислоте (м-РНК) с помощью ферментов[31], определяется именно последовательностью нуклеотидов на этой РНК. Набору из трёх азотистых оснований, который называется *триплет нуклеотидов* или *кодон*, соответствует одна и только одна α-аминокислота. В настоящее время насчитывается 20 таких аминокислот (табл. х). Но одной аминокислоте может соответствовать несколько триплетов нуклеотида. Соответствие аминокислоты кодонам называется *генетическим кодом*. Реакции синтеза белка, у которого последовательность аминокислотных звеньев определяется последовательностью нуклеотидов м-РНК, называются *реакциями матричного синтеза*.

Последовательность нуклеотидов и-РНК в свою очередь определяется последовательностью азотистых оснований в *дезоксирибонуклеиновой кислоте* (ДНК), на которой и происходит синтез м-РНК

Дезоксирибонуклеиновые кислоты – это кислоты, состоящие из двух полинуклеотидных цепей, включающих в себя остаток дезоксирибозы, радикалы аденина, гуанина, цитозина, тимина и соединённых между собой по принципу комплементарности (совместимости) водородными связями. То есть, вместо радикала урацила, нуклеотиды ДНК содержат тимил, вместо остатка рибозы, остаток дезоксирибозы,



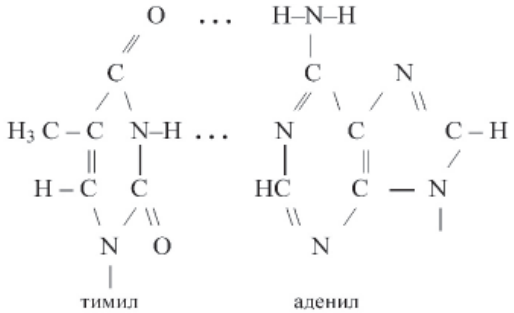
образующей замкнутый цикл соединением альдегидной группы с гидроксогруппой четвёртого атома углерода.

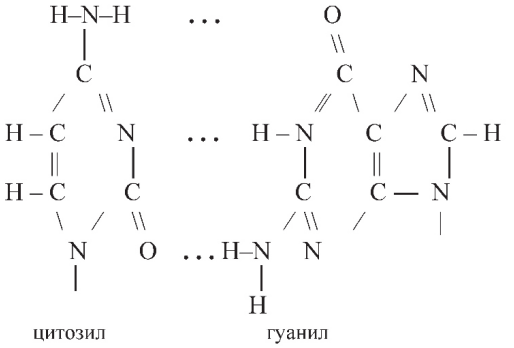
[31] Ферменты – это органические природные катализаторы биохимических процессов, протекающих в живых организмах.

При этом А комплементарен Т, Г комплементарен Ц. То есть, фрагмент первичной структуры ДНК можно представить следующим образом:

```
|     |
А ::: Т
|     |
Т ::: А
|     |
А ::: Т
|     |
Г⋮⋮⋮Ц
|     |
Ц⋮⋮⋮Г
|     |
```

Действительно, аденил в ДНК образует водородную связь только с тимилом, а тимил, только с аденилом. Гуанил только с цитозилом, а цитозил только с гуанилом:





Молекулярную формулу одного из нуклеотидов ДНК можно представить так

$$HPO_3 - C_5H_7O_2 - ,$$
$$\quad\quad\quad\quad |$$
$$\quad\quad\quad\quad т$$

где т – тимил.

Вторичная структура ДНК представляет собой двойную спираль – две нити ДНК закручены одна вокруг другой (рис. 2.10).

Рис. 2.10. Вторичная структура ДНК

Ферментативный синтез м-РНК осуществляется на одной из цепей ДНК в соответствии с принципом комплементарности. При этом аденин ДНК комплементарен урацилу РНК, тимил ДНК коиплементарен аденину РНК, гуанил ДНК комплементарен цитозилу РНК, цитозил ДНК комплементарен гуанилу РНК. Затем с м-РНК осуществляется матричный синтез белка. К каждому кодону информационной РНК доставляется соответствующая аминокислота с помощью транспортной РНК (т-РНК).

Таким образом, основным хранителем информации о структуре всех белков, вырабатываемых организмом является ДНК.

Отрезок ДНК, содержащий информацию о первичной структуре одного определённого белка, называется геном.

Процесс переписывания информации, содержащейся в гене ДНК на м-РНК называется транскрипцией.

---

1. Приведите структурные формулы аминокислот, которые Вы знаете. Дайте им названия.

2. Дайте определения понятиям: полипептиды и белки.

3. Что представляют собой первичная, вторичная, третичная и четвертичная структуры белка?

4. В чём сходство и различия химического состава, строения ДНК и РНК? Что такое ген?

5. Каким образом в клетках живых организмов синтезируется м-РНК? Что такое транскрипция?

6. Что такое матричный синтез? Почему в качестве отдельной структурной единицы РНК рассматривают три соседних нуклеотида, а не два или, например, четыре?

2.2. Неклассическая и постнеклассическая химия

В предыдущих разделах второй главы нами рассмотрены лишь некоторые направления классической химии.

Неклассическая химия, опираясь на некоторые достижения неклассической физики, в частности на представления о волновых свойствах электронов и вероятностном характере их движения вокруг ядра атома, пытается объяснять и даже предсказывать химические свойства веществ особенностями поведения этих электронов. Взаимосвязанными разделами неклассической химии являются квантовая химия и вычислительная химия.

Квантовая химия изучает строение и свойства химических соединений, реакционную способность, кинетику и механизм химических реакций на основе квантовой механики, которая в свою очередь, показала некорректность бинарной логики выбора: либо частица-точка, либо неограниченная волна для элементарных частиц.

Под вычислительной химией сегодня подразумевают раздел химии, в котором используют математические методы объяснения и предсказания химических свойств молекул, адаптированные для составления специальных компьютерных программ, позволяющих не только описывать свойства химических реагентов, но также планировать синтез новых веществ с заранее заданными свойствами.

Постнеклассическая химия характеризуется открытием сложных химических синергетических самоорганизующихся процессов, течение которых не является жёстко детерминированным, т. е. не является предсказуемым с помощью конкретных уравнений.

§ 2.2.1. Реакция Белоусова-Жаботинского

К синергетическим процессам относят колебательную реакцию Белоусова-Жаботинского в которой происходят колебательные изменения ионов Ce^{3+} и Ce^{4+}.

$$Ce^{3+} \rightleftarrows Ce^{4+}.$$

Приведённая схема не означает течение равновесного термодинамического обратимого процесса, как это принято в классической химии, а символизирует ***неравновесное*** колебание концентраций Ce^{3+} и Ce^{4+}. Уменьшение концентрации одного из ионов является результатом увеличения концентрации другого. Если в качестве Ce^{3+} взять $Ce_2(SO_4)_3$, то:

$$Ce_2(SO_4)_3 \rightleftarrows Ce(SO_4)_2.$$

Практически, в перемешиваемом растворе при этом наблюдаются колебания цвета раствора между бесцветным (избыток Ce^{3+}) и жёлтым (избыток Ce^{4+}). При добавлении в раствор индикатора ферроина $Fe(C_{12}H_8N_2)_3SO_4$ происходит чередование синего цвета (избыток Ce^{3+}) и красного (избыток Ce^{4+}) (рис. 2.11).

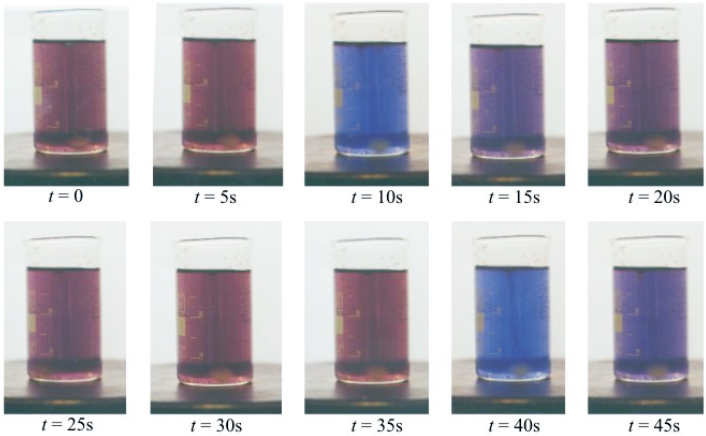


Рис. 2.11. Чередование цветов в реакции Белоусова-Жаботинского

§ 2.2.2. Модель «Орегонатор»

Одной из первых моделей, объясняющих колебательное течение химического процесса, стал механизм, получивший название «Орегонатор».

В рамках этой модели возможен вариант водного раствора исходных веществ, включающий в себя следующие компоненты: серную кислоту H_2SO_4, малоновую кислоту $HOOC{-}CH_2{-}COOH$, сульфат церия (III) $Ce_2(SO_4)_3$, бромат калия $KBrO_3$ и бромид калия KBr. В этом случае ионное уравнение *прямой* реакции превращения Ce^{3+} в Ce^{4+} может быть представлено следующим образом:

$$2Ce^{3+} + 2BrO_3^- + Br^- + 5H^+ \longrightarrow HBrO + 2HBrO_2 + H_2O + 2Ce^{4+}.$$

стадии прямой реакции:

1. $BrO_3^- + Br^- + 2H^+ \longrightarrow HBrO_2 + HBrO.$

2. $BrO_3^- + HBrO_2 + H^+ \longrightarrow H_2O + 2BrO_2^{\bullet}.$

3. $2Ce^{3+} + 2BrO_2^{\bullet} + 2H^+ \longrightarrow 2HBrO_2 + 2Ce^{4+}.$

Ионное уравнение *обратной* реакции превращения Ce^{4+} в Ce^{3+}:

$$2Ce^{4+} + 3HBrO_2 + 3CH_2(COOH)_2 + H_2O \longrightarrow HBrO +$$
$$+BrO_3^- + Br^- + 3CHOH(COOH)_2 + 4H^+ + 2Ce^{3+},$$

стадии обратной реакции:

4. $HBrO_2 + Br^- + H^+ \longrightarrow 2HBrO.$

5. $2HBrO_2 \longrightarrow BrO_3^- + HBrO + H^+.$

6. $2CH_2(COOH)_2 + 2HBrO \longrightarrow 2CHBr(COOH)_2 + 2H_2O.$

7. $2Ce^{4+} + 2CHBr(COOH)_2 + 2CH_2(COOH)_2 + 3H_2O \longrightarrow 2Br^- +$
$+3CHOH(COOH)_2 + 4H^+ + 2Ce^{3+}.$

Суммарный процесс, объединяющий прямую и обратную реакции (с учётом первой стадии прямой реакции), не включает ионы церия и протекает с выделением тепла:

$$2BrO_3^- + Br^- + 3CH_2(COOH)_2 + 3H^+ \longrightarrow 3HBrO + 3CHOH(COOH)_2 + Q.$$

То есть, Ce^{3+} и Ce^{4+} участвуют лишь в качестве катализатора.

Всю реакцию можно представить в виде циклических процессов, представленных на рис. 2.12. После внесения в раствор исходных веществ, реакционная смесь претерпевает все семь стадий с 1 по 7, после чего процесс замыкается в цикл: 3,4,5,6, 7, 3, 4, 5,6,7, 3, 4, 5, 6, 7...и так далее.

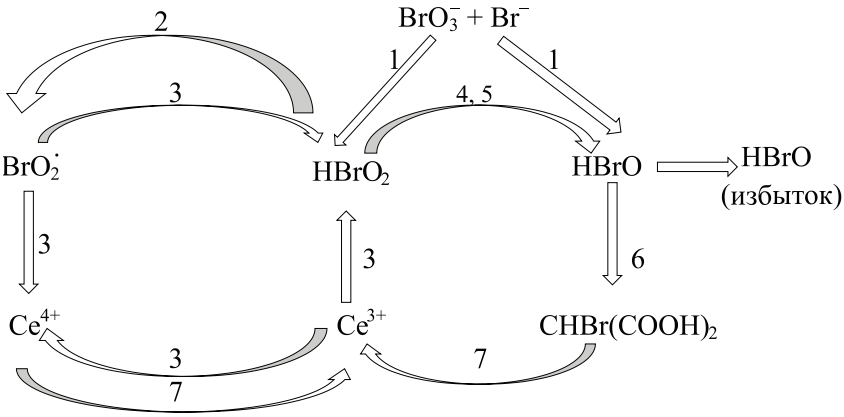


Рис. 2.12. Условная схема орегонатора. Цифры 1–7 символизируют номер стадии

Соответствующие молекулярные уравнения могут выглядеть так:

прямая реакция

$$2Ce_2(SO_4)_3 + 4KBrO_3 + 2KBr + 5H_2SO_4 \longrightarrow 4Ce(SO_4)_2 +$$
$$+2HBrO + 4HBrO_2 + 2H_2O + 3K_2SO_4,$$

стадии прямой реакции

1. $KBrO_3 + KBr + H_2SO_4 \longrightarrow HBrO + HBrO_2 + K_2SO_4$.
2. $2KBrO_3 + 2HBrO_2 + H_2SO_4 \longrightarrow 2H_2O + 4BrO_2^{\bullet} + K_2SO_4$.
3. $2Ce_2(SO_4)_3 + 4BrO_2^{\bullet} + 4H_2SO_4 \longrightarrow 4HBrO_2 + 4Ce(SO_4)_2$.

Обратная реакция

$$4Ce(SO_4)_2 + 6HBrO_2 + 6CH_2(COOH)_2 + 2H_2O \longrightarrow 2HBrO +$$
$$+2HBrO_3 + 2HBr + 6CHOH(COOH)_2 + 2H_2SO_4 + 2Ce_2(SO_4)_3,$$

стадии обратной реакции:

4. $2HBrO_2 + 2KBr + H_2SO_4 \longrightarrow 4HBrO + K_2SO_4$.
5. $2HBrO_2 \longrightarrow HBrO_3 + HBrO$.
6. $4CH_2(COOH)_2 + 4HBrO \longrightarrow 4CHBr(COOH)_2 + 4H_2O$.
7. $4Ce(SO_4)_2 + 4CHBr(COOH)_2 + 2CH_2(COOH)_2 +$
$+6H_2O \longrightarrow 4HBr + 6CHOH(COOH)_2 + 2H_2SO_4 + 2Ce_2(SO_4)_3$.

Суммарный процесс, объединяющий прямую и обратную реакции (с учётом первой стадии прямой реакции), не включает соли церия и является экзотермическим:

$$4KBrO_3 + 2KBr + 3H_2SO_4 + 6CH_2(COOH)_2 \longrightarrow 6HBrO +$$
$$+6CHOH(COOH)_2 + 3K_2SO_4 + Q.$$

То есть, соль церия участвует в процессе лишь в качестве катализатора.

Из последнего уравнения можно сделать вывод, что если для поддержания *физических* процессов самоорганизации системы необходимо непрерывно подводить и отводить ту или иную энергию (тепловую, механическую, электрическую и т. д.), то для поддержания *химических* процессов самоорганизации необходимо подводить и выводить химические вещества. В данном случае, подводить: $KBrO_3$, KBr, H_2SO_4, $CH_2(COOH)_2$, а выводить HBrO, $CHOH(COOH)_2$, K_2SO_4.

То есть, физические и химические синергетические системы являются *открытыми* – обменивающимися с внешней средой энергией и веществами.

Рассмотренная модель, действительно, объясняла наблюдаемые простейшие колебания (рис. 2.13).

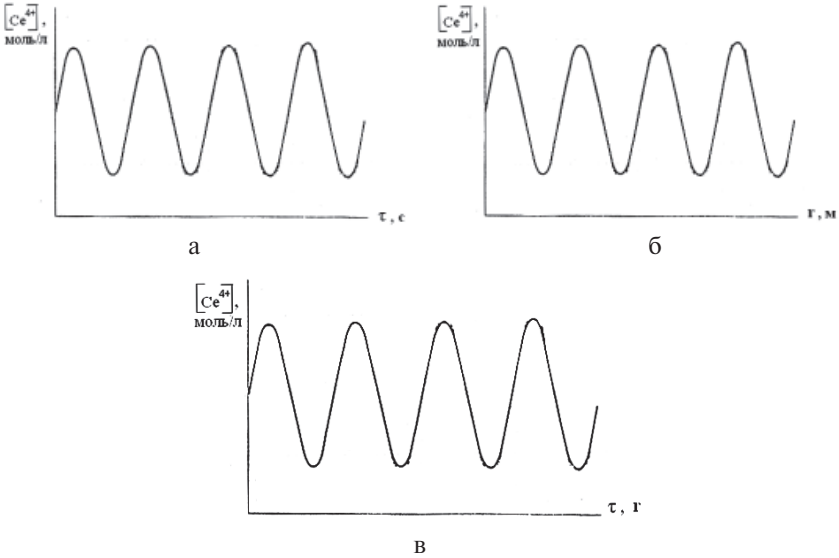


Рис. 2.13. Изменения концентрации Ce^{4+} во времени (а), в пространстве (б), одновременно во времени и пространстве (в)

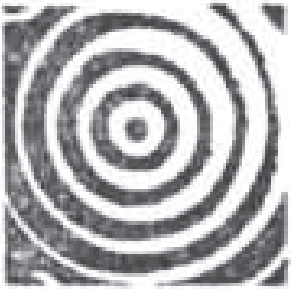


Рис. 2.14. Концентрические круги, образуемые при реакции Белоусова-Жаботинского

Если реакция протекает в присутствии ферроина, то колебания, представленные на рис. 2.13 (а) проявляются чередованием синего и красного цвета перемешиваемого реакционного раствора. Колебания рис. 2.13 (б) представляют собой неподвижные разноцветные концентрические круги (рис. 2.14) на поверхности неперемешиваемого раствора в чашке Петри. Колебания рис. 2.13 (в) проявляются разноцветными концентрическими кругами, непрерывно расширяющимися от центра к периферии.

Однако, экспериментаторы, варьируя начальные условия опытов, получали иногда сложно-периодические и хаотические колебания (рис. 2.15), возникновения которых орегонатор объяснить не мог.

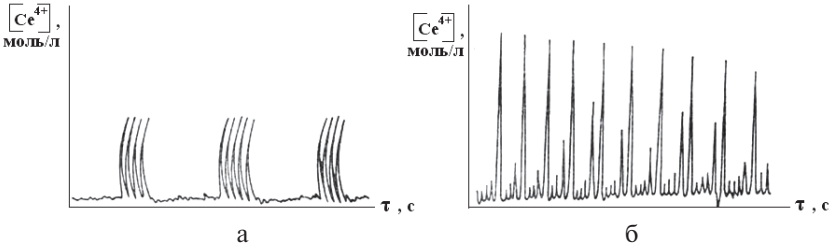


Рис. 2.15. Нестационарные сложно-периодические колебания концентрации Ce^{4+} (а) и хаотические колебания $[Ce^{4+}]$((б)

§ 2.2.3. Элементарные стадии реакции Белоусова-Жаботинского

По мере продолжения исследования реакции Белоусова-Жаботинского стало ясно, что реальный механизм процесса ещё сложнее. Намного. В настоящее время насчитывается до 80 элементарных стадий, которые приведены ниже в табл. 2.2 с использованием условных обозначений:

знак ≡ символизирует тождество;

$A \equiv CH_2(COOH)_2$;

$ENOL \equiv COOH{-}CH = C(OH)_2$;

$TTA \equiv CHOH(COOH)_2$;

$OA \equiv HOOC{-}COOH$.

Таблица 2.2

Элементарные стадии реакции Белоусова-Жаботинского

N пп	Стадия	Константа скорости	N пп	Стадия	Константа скорости
1. Неорганическая часть					
1	$HOBr + Br^- + H^+ \rightarrow Br_2 + H_2O$	$2.3\cdot10^9$	8	$BrO_3^- + HOBr + H^+ \rightarrow 2HBrO_2$	$7.5\cdot10^{-9}$
2	$Br_2 + H_2O \rightarrow HOBr + Br^- + H^+$	2.0	9	$BrO_3^- + HBrO_2 + H^+ \rightarrow Br_2O_4 + H_2O$	33.0
3	$Br^- + HBrO_2 + H^+ \rightarrow 2HOBr$	$2.0\cdot10^6$	10	$Br_2O_4 + H_2O \rightarrow BrO_3^- + HBrO_2 + H^+$	2200
4	$2HOBr \rightarrow Br^- + HBrO_2 + H^+$	$2.0\cdot10^{-5}$	11	$Br_2O_4 \rightarrow 2BrO_2^{\bullet}$	$7.4\cdot10^4$
5	$Br^- + HBrO_3^- + 2H^+ \rightarrow HOBr + HBrO_2$	2.0	12	$2BrO_2^{\bullet} \rightarrow Br_2O_4$	$1.4\cdot10^9$
6	$HOBr + HBrO_2 \rightarrow Br^- + HBrO_3^- + 2H^+$	3.3	13	$Ce^{3+} + 2BrO_2^{\bullet} + H^+ \rightarrow HBrO_2 + Ce^{4+}$	$5.2\cdot10^4$
7	$2HBrO_2 \rightarrow BrO_3^- + HOBr + H^+$	$3.0\cdot10^3$	14	$HBrO_2 + Ce^{4+} \rightarrow Ce^{3+} + 2BrO_2^{\bullet} + H^+$	$7.0\cdot10^3$
2. Реакции с участием органических веществ					
а) Реакции без участия и образования радикалов					
15	$MA \rightarrow ENOL$	$3.0\cdot10^{-3}$	20	$TTA + HOBr \rightarrow BrTTA + H_2O$	5.0
16	$ENOL \rightarrow MA$	200.0	21	$BrO_2MA + H_2O \rightarrow HBrO_2 + TTA$	1.0
17	$ENOL + Br_2 \rightarrow BrMA + Br^- + H^+$	$1.91\cdot10^6$	22	$BrO_2MA \rightarrow HOBr + MOA$	1.0
18	$MA + HOBr \rightarrow Br_2MA + H_2O$	8.2	23	$BrO_2TTA \rightarrow HBrO_2 + MOA$	1.0
19	$Br_2MA + H_2O \rightarrow MA + HOBr$	0.1	24	$BrTTA \rightarrow Br^- + MOA + H^+$	1.0
б) Реакции с образованием радикалов					
25	$Ce^{4+} + BrMA \rightarrow Ce^{3+} + BrMA^{\bullet} + H^+$	0.09	29	$Ce^{4+} + MOA + H_2O \rightarrow Ce^{3+} + OA + {}^{\bullet}COOH + H^+$	10.0
26	$Ce^{4+} + MA \rightarrow Ce^{3+} + MA^{\bullet} + H^+$	0.23	30	$HOBr + OA \rightarrow Br^{\bullet} + {}^{\bullet}COOH + CO_2 + H_2O$	140.0
27	$Ce^{4+} + TTA \rightarrow Ce^{3+} + TTA^{\bullet} + H^+$	0.66	31	$Ce^{4+} + OA \rightarrow Ce^{3+} + {}^{\bullet}COOH + H^+ + CO_2 + H^+$	10.0
28	$HOBr + MOA \rightarrow Br^{\bullet} + OA + {}^{\bullet}COOH$	140.0	32	$BrO_3^- + OA + H^+ \rightarrow BrO_2^{\bullet} + {}^{\bullet}COOH + CO_2 + H^+$	$1.6\cdot10^{-5}$
в) Реакции гибели радикалов					
33	$2Br^{\bullet} \rightarrow Br_2$	$1.0\cdot10^8$	44	$MA^{\bullet} + Br^{\bullet} \rightarrow BrMA$	$1.0\cdot10^9$
34	$Br^{\bullet} + BrMA^{\bullet} \rightarrow Br_2MA$	$1.0\cdot10^9$	45	$MA^{\bullet} + Ce^{3+} + H^+ \rightarrow MA + Ce^{4+}$	$1.7\cdot10^4$
35	$2BrMA^{\bullet} + H_2O \rightarrow BrMA + BrTTA$	$1.0\cdot10^8$	46	$MA^{\bullet} + BrO_2^{\bullet} \rightarrow BrO_2MA$	$5.0\cdot10^9$
36	$BrMA^{\bullet} + MA + H_2O \rightarrow MA + BrTTA$	$1.0\cdot10^9$	47	$2TTA^{\bullet} \rightarrow TTA + MOA$	$1.0\cdot10^9$
37	$BrMA^{\bullet} + TTA^{\bullet} + H_2O \rightarrow TTA + BrTTA$	$1.0\cdot10^9$	48	$TTA^{\bullet} + {}^{\bullet}COOH \rightarrow TTA + CO_2$	$2.0\cdot10^9$
38	$BrMA^{\bullet} + Ce^{4+} + H_2O \rightarrow Ce^{3+} + BrTTA + H^+$	$1.0\cdot10^7$	49	$TTA^{\bullet} + Br^{\bullet} \rightarrow BrTTA$	$1.0\cdot10^9$
39	$BrMA^{\bullet} + BrO_2^{\bullet} + H_2O \rightarrow HBrO_2 + BrTTA$	$5.0\cdot10^9$	50	$TTA^{\bullet} + Ce^{3+} + H^+ \rightarrow TTA + Ce^{4+}$	$1.7\cdot10^4$
40	$BrMA^{\bullet} + {}^{\bullet}COOH \rightarrow BrMA + CO_2$	$5.0\cdot10^8$	51	$TTA^{\bullet} + BrO_2^{\bullet} \rightarrow BrO_2TTA$	$5.0\cdot10^9$
41	$2MA^{\bullet} + H_2O \rightarrow MA + TTA$	$3.2\cdot10^9$	52	$2{}^{\bullet}COOH \rightarrow OA$	$1.2\cdot10^9$
42	$MA^{\bullet} + TTA^{\bullet} + H_2O \rightarrow 2TTA$	$1.0\cdot10^9$	53	${}^{\bullet}COOH + Ce^{4+} \rightarrow Ce^{3+} + CO_2 + H^+$	$1.0\cdot10^7$
43	$MA^{\bullet} + {}^{\bullet}COOH \rightarrow MA + CO_2$	$2.0\cdot10^9$	54	${}^{\bullet}COOH + Br^{\bullet} \rightarrow Br^- + CO_2 + H^+$	$1.0\cdot10^9$
			55	${}^{\bullet}COOH + BrO_2^{\bullet} \rightarrow HBrO_2 + CO_2$	$5.0\cdot10^9$
г) Реакции продолжения цепи					
56	$MA^{\bullet} + Br_2 \rightarrow BrMA + Br^{\bullet}$	$1.5\cdot10^8$	69	$BrMA^{\bullet} + HOBr \rightarrow BrTTA + Br^{\bullet}$	$1.0\cdot10^5$
57	$MA^{\bullet} + HOBr \rightarrow TTA + Br^{\bullet}$	$1.0\cdot10^7$	70	$BrMA^{\bullet} + BrO_3^- + H^+ \rightarrow BrTTA + BrO_2^{\bullet}$	40.0
58	$MA^{\bullet} + BrO_3^- + H^+ \rightarrow TTA + BrO_2^{\bullet}$	40.0	71	${}^{\bullet}COOH + BrMA \rightarrow Br^- + MA^{\bullet} + CO_2 + H^+$	$1.0\cdot10^7$
59	$MA^{\bullet} + TTA \rightarrow MA + TTA$	$1.0\cdot10^5$	72	${}^{\bullet}COOH + Br_2 \rightarrow Br^- + Br^{\bullet} + CO_2 + H^+$	$1.5\cdot10^8$
60	$TTA^{\bullet} + MA \rightarrow MA^{\bullet} + TTA$	$1.0\cdot10^5$	73	${}^{\bullet}COOH + HOBr \rightarrow Br^{\bullet} + CO_2 + H_2O$	$2.0\cdot10^7$
61	$MA^{\bullet} + BrMA \rightarrow MA + BrMA^{\bullet}$	$1.0\cdot10^5$	74	${}^{\bullet}COOH + BrO_3^- + H^+ \rightarrow BrO_2^{\bullet} + CO_2 + H_2O$	$2.1\cdot10^3$
62	$BrMA^{\bullet} + MA \rightarrow BrMA + MA^{\bullet}$	$5.0\cdot10^2$	75	$Br^{\bullet} + MA \rightarrow Br^- + MA^{\bullet} + H^+$	$1.0\cdot10^5$
63	$TTA^{\bullet} + BrMA \rightarrow TTA + BrMA^{\bullet}$	$2.0\cdot10^5$	76	$Br^{\bullet} + TTA \rightarrow Br^- + TTA^{\bullet} + H^+$	$1.0\cdot10^6$
64	$BrMA^{\bullet} + TTA \rightarrow BrMA + TTA^{\bullet}$	$5.0\cdot10^3$	77	$Br^{\bullet} + BrMA \rightarrow Br^- + BrMA^{\bullet} + H^+$	$5.0\cdot10^6$
65	$TTA^{\bullet} + Br_2 \rightarrow BrTTA + Br^{\bullet}$	$1.0\cdot10^8$	78	$Br^{\bullet} + MOA + H_2O \rightarrow Br + OA + {}^{\bullet}COOH + H^+$	$2.0\cdot10^3$
66	$TTA^{\bullet} + HOBr \rightarrow MOA + Br^{\bullet} + H_2O$	$1.0\cdot10^7$	79	$Br^{\bullet} + OA \rightarrow Br^- + {}^{\bullet}COOH + CO_2 + H^+$	$2.0\cdot10^3$
67	$TTA^{\bullet} + BrO_3^- + H^+ \rightarrow MOA + BrO_2^{\bullet} + H_2O$	40.0	80	$BrO_2^{\bullet} + OA \rightarrow HBeO_2 + {}^{\bullet}COOH + CO_2$	$1.0\cdot10^2$
68	$BrMA^{\bullet} + Br_2 \rightarrow Br_2MA + Br^{\bullet}$	$1.0\cdot10^6$			

Сложная взаимосвязь этих стадий представлена на рис. 2.16.

Важно отметить, что реакция Белоусова-Жаботинского описывается кинетическими уравнениями, которые при определённых граничных условиях имеют несколько решений – то есть, процесс может протекать в одном из нескольких направлений и быть представленным одним из рис. 2.13 (а, б, в) или 2.15 (а, б). Предсказать конкретное направление дальнейшего течения реакции невозможно в принципе. При этом недетерминированной оказывается не только форма процесса, но и частота колебаний. Точка ветвления направлений течения реакции называется точкой ***бифуркации***.

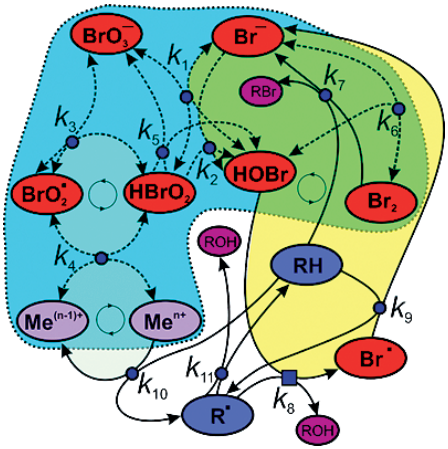


Рис. 2.16. Графическая схема реакции Белоусова Жаботинского:
$Me^{n+} \equiv Ce^{4+}$; $R \equiv HOOC–C^{\cdot}H–COOH$

§ 2.2.4. Общие черты синергетических систем

Подводя итог рассмотрению синергетических систем (физических и химических), можно выделить следующие черты, присущие большинству из них: открытость, обратная связь, диссипация, аттрактор, фрактал, бифуркация, самоорганизация, неустойчивость.

1. Открытость. Синергетические системы являются открытыми, то есть, обменивающимися с внешней средой энергией и веществами.

2. Обратная связь. Синергетические системы являются системами с обратной связью. Обратная связь между объектами – это взаимозависимость между сигналом, исходящим от каждого из них по направлению

к другому, и сигналом, поступающим от другого. В реакции Белоусова-Жаботинского обратная связь наблюдается, например, между концентрациями Ce^{3+} и Ce^{4+}. В качестве сигнала можно рассматривать *изменение* их концентрации. Исходящий от Ce^{4+} сигнал о превышении некоторой критической $[Ce^{4+}]_{max}$ приводитт к получению сигнала от Ce^{3+} об уменьшении концентрации Ce^{3+} до некоторого критического минимума $[Ce^{3+}]_{min}$, в результате чего запускается процесс $Ce^{3+} \longrightarrow Ce^{4+}$. По истечении некоторого времени от Ce^{4+} пойдёт сигнал об уменьшении концентрации Ce^{4+} до некоторого критического минимума $[Ce^{4+}]_{min}$, что приводит к получению сигнала от Ce^{3+} об увеличении концентрации Ce^{3+} до некоторой критической $[Ce^{4+}]_{max}$, в результате чего запускается процесс $Ce^{3+} \longrightarrow Ce^{4+}$.

3. Диссипация. Термин «Диссипа́ция» происходит от латинского слова *dissipatio*, что означает «рассеивание». В частности, диссипация *энергии* – это переход части энергии упорядоченных процессов (кинетической энергии движущегося тела, энергии электрического тока и т.д.) в энергию неупорядоченных процессов, в конечном итоге – в тепло. Диссипация атмосфер планет – рассеивание атмосферы планет вследствие улетучивания составляющих их газов в космическое пространство. Реакционная система Белоусова-Жаботинского является диссипативной системой.

Диссипативная система – это открытая система, образующая динамичные структуры в неравновесном состоянии при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне. Диссипативная система иногда называется ещё *неравновесной открытой системой*. В реакции Белоусова-Жаботинского диссипация энергии проявляется экзотермическим характером суммарного процесса. Динамичные структуры представлены на рис. 2.13, 2.15, 2.18. Строго говоря, диссипация энергии наблюдается во всех экзотермических реакциях, однако, большинство соответствующих реакционных систем не относят к диссипативным системам именно из-за отсутствия в них динамичных самоорганизующихся структур.

4. Аттрактор. Аттрактор – это форма, к которой стремится наблюдаемый объект. Например, если наблюдаемый объект представляет собой спиральную траекторию движения в воронке шарика (рис. 2.17), то аттрактором является точка.

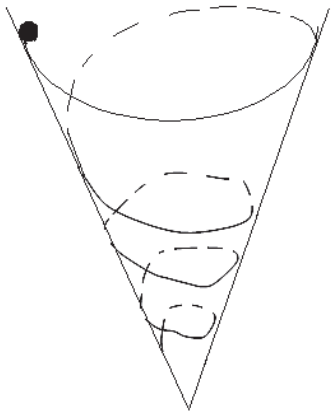
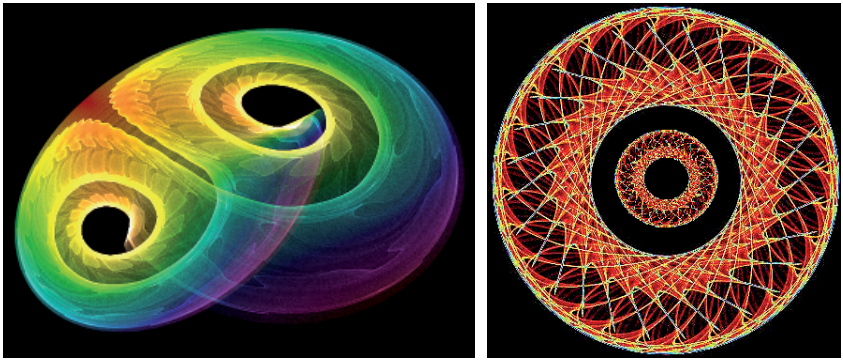


Рис. 2.17. Спиральная траектория движения шарика в воронке

Аттрактор реакции Белоусова-Жаботинского, формируемый в неперемешиваемых растворах, называют *странным* аттрактором. Наблюдаемым объектом в этой реакции являются пространственные структуры, в пределах которых осуществляются концентрационные колебания ионов Ce^{3+} и Ce^{4+}. При этом аттрактор может приобретать самые причудливые очертания, например, такие как приведены на рис. 2.18 (а, б).



а б

Рис. 2.18. Возможные аттракторы, формируемые в неперемешиваемых растворах реакции Белоусова-Жаботинского

Из рис. 2.18 (б) или 2.14 особенно наглядно видно, что странный аттрактор представляет собой круги, форма которых повторяется при изменении масштаба, то есть, обладает свойством самоподобия. Подобные структуры называются фрактальными.

5. Фракталы. Фракталы – это объекты, обладающие свойством самоподобия. Например, рис. 2.19 или 2.14.

Рис. 2.19. Образцы простейших фракталов

6. Бифуркация. Выше уже отмечалось, что точкой бифуркации называется точка ветвления направлений течения процесса, примеры которой графически представлены на рис. 2.20.

7. Автоколебание. Автоколебание – это незатухающее колебание, поддерживающиеся за счёт энергии постоянного, то есть *непериодического* внешнего воздействия, отличающееся от вынужденных колебаний тем, что последние вызваны *периодическим* внешним воздействием и происходят с частотой этого воздействия, в то время как возникновение автоколебаний

и их частота определяются внутренними свойствами самой автоколебательной системы. В реакции Белоусова-Жаботинского автоколебание может поддерживаться непрерывной подачей в реакционную смесь исходных веществ и, сопровождающейся отводом продуктов реакции.

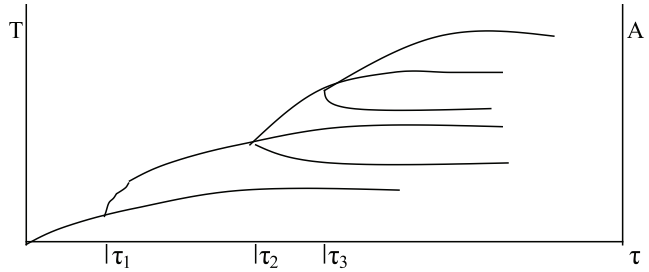


Рис. 2.20. Зависимость от времени τ периода T и амплитуды A колебаний концентрации Ce^{3+} или Ce^{4+} в реакции Белоусова-Жаботинского: τ_1 – точка бифуркации первичной, τ_2 – точка вторичной бифуркации, τ_3 – точка третичной бифуркации

8. Самоорганизация. Под самоорганизацией системы подразумевается *процесс пространственного, временного или пространственно-временного упорядочения элементов этой системы за счёт их согласованного взаимодействия*. В частности реакция Белоусова-Жаботинского структурируется в процесс гармонического колебания концентраций ионов Ce^{3+} и Ce^{4+}, которое можно наблюдать во времени, пространстве и пространственно-временном континууме.

9. Неустойчивость. В реакции Белоусова-Жаботинского неустойчивость проявляется в отсутствии равновесия скоростей прямой и обратной реакции. Колебание концентраций ионов Ce^{3+} и Ce^{4+} свидетельствует о том, что одна из этих скоростей всегда больше другой.

Заключение главы 2

В настоящее время известно много реакций типа Белоусова-Жаботинского, например, реакция Бриггса-Раушера, в которой взаимодействие пероксида водорода, йодноватой кислоты, сульфата марганца (II), крахмала, серной и малоновой кислот, приводит к образованию колебательной реакции с переходами цветов: бесцветный – золотой – синий.

Все эти реакции являются объектами исследования постнеклассической химии. Однако, следует иметь в виду, что достижение химией постнеклассического уровня, конечно, не означает прекращения развития химии в рамках классической и неклассической химии. Классическая и неклассическая химия также продолжают своё развитие всё увеличивающимися темпами.

Глава 3. Биология

3.1. Классическая биология

§ 3.1.1. Основные понятия классической биологии

Дословный перевод слова биология с латинского означает «наука о жизни»: «Bios» – жизнь, «logos» – наука.

Все разделы классической биологии объясняют свойства изучаемых объектов преимущественно строением этих объектов и свойствами составляющих их компонентов, в том числе химическими или физическими. Активное использование биологами достижений физики, химии, кибернетики приводило зачастую к невозможности чёткого отделения биологии от других наук, однозначного определения, где заканчивается одна наука и начинается другая. В результате, в последние десятилетия, в рамках классической науки, помимо традиционных разделов биологии (ботаника, зоология, анатомия, физиология и др.) сформировался целый ряд более современных разделов на так называемом «стыке»: биохимия, биофизика, молекулярная биология, генная инженерия и др. Общая биология изучает закономерности существования живых тел, общие для всех разделов биологии, как традиционных, так и более современных. Важнейшим понятием общей биологии является «жизнь». Оно настолько тесно взаимосвязано с понятием «организм», что они определяются друг через друга.

Жизнь – это совокупность процессов, обеспечивающих сохранение гомеостаза, развитие и размножение организма.

Организм – любое живое существо.

Существуют две формы живых организмов по типу питания: *автотрофы и гетеротрофы*.

Автотрофы – организмы, способные получать самостоятельное питание за счет воды, углекислого газа, энергии солнца, энергии химических реакций. К таким организмам относятся растения и некоторые виды бактерий. В частности у растений энергия солнечного света преобразуется в энергию химических связей (растения – накопители солнечной энергии). Этот процесс называется ***фотосинтезом.*** За счет энергии солнца, CO_2 и воды образуются молекулы глюкозы. В последствии, при распаде сахаров, освобождается энергия, необходимая растениям для осуществления процессов жизнедеятельности.

Некоторые бактерии используют энергию химических связей (***хемосинтез***). Известны бактерии, извлекающие энергию окисления аммиака в азотную кислоту, другие извлекают энергию из окисления двухвалентного железа в трехвалентное (железобактерии), или окисления сероводорода до серной кислоты (серобактерии)

Гетеротрофы – организмы, питающиеся готовыми органическими веществами (животные, многие микроорганизмы). При распаде сложных молекул пищи образуются простые вещества. При этом процессе освобождается энергия, необходимая для жизнедеятельности организмов.

Гомеостаз – динамичное постоянство параметров и химического состава организма, сохраняющееся при изменениях параметров внешней среды, воздействующей на него.

Например, при колебаниях температуры окружающего воздуха от +30, до –30 °С, температура тела здорового человека будет находиться в пределах от +36,2 до +36,9 °С. Соотношение концентраций ионов H^+ и OH^- в крови человека также не меняется при любом составе принятой пищи.

Развитие – возрастание уровня приспособленности к внешней среде за счёт необратимого изменения строения систем органов. Как правило, развитие организма сопровождается его *ростом* – увеличением размеров. В стадиях развития можно выделить два этапа – позитивное развитие и негативное развитие. При этом под негативным развитием подразумеваются деградация и старение, приводящие к уменьшению уровня приспособленности к внешней среде.

Существо признаётся живым, если в нём сохраняются процессы, обеспечивающие хотя бы одно из направлений, перечисленных в определении жизни. Например, если организм, по каким то причинам оказывается неспособным к размножению, но сохраняет способность поддерживать гомеостаз и развиваться, то такой организм считается живым. Если в силу особенностей организма не поддерживается в полном объёме гомеостаз (пресмыкающиеся, принимающие температуру окружающей среды), но сохраняется способность к развитию и размножению, такой организм также считается живым.

Следует отметить, что попытки экспериментального доказательства естественного происхождения жизни на земле из неживого материала, пока, нигде не увенчались успехом. Хотя, неорганические вещества при определённых условиях могут превращаться в органические, образовывать белковые молекулы и даже рибонуклеиновые кислоты, однако, получить из этого органического материала тело с характерными признаками жизни, ещё никому не удалось.

Между тем, стало известно, что на земле не существует геологических пород, не содержащих живого вещества. Хотя бы на уровне одноклеточных организмов. Даже самые древние породы, насчитывающие 3,5 миллиарда лет содержат включения, наличие которых можно объяснить только жизнедеятельностью микроорганизмов того времени. Всё это позволяет говорить о «геологической вечности» жизни на земле.

Теперь рассмотрим понятия, предназначенные для описания свойств живого организма:

Движение – это способность передвигаться в пространстве. У простейших (одноклеточных) организмов органами передвижения служат *реснички, жгутики, ложноножки, миофибриллы*, у многоклеточных организмов сложно развитые *конечности*. Для растений также характерна способность к движению, хотя и не столь выраженная: рассеивание семян и спор, передвижение с помощью корневищ и др.

Рост – это способность увеличиваться в размерах и массе за счет деления клеток и растяжения тканей.

Раздражимость – способность давать ответные реакции на различные раздражители (химические, физиологические и другие). Реакция может быть самой разнообразной – от механического движения (одёргивание руки от горячего утюга) до изменения химического состава тканей (изменение окраски у хамелеона).

Размножение – способность производить себе подобные организмы. Это, пожалуй, самый характерный признак живого. Любой живой организм стремится оставить после своего существования максимально большее количество потомков. Это свойство, генетически заложено в каждом живом организме. Потомки сохраняют и, в свою очередь, передают дальше генофонд родителей по наследству.

Совокупность перечисленных признаков, несомненно, характеризует живое как открытую систему, связанную с неживой природой обменом веществ и энергией, способную активно реагировать на изменения ее параметров и, по-возможности, оставлять потомство.

Метаболизм – это обмен веществ между организмом и внешней средой (рис. 3.1). Иногда под этим термином подразумевают обмен веществ между различными органами внутри организма. Таким образом, организм является открытой системой, постоянно обменивающейся веществами и энергией с внешней средой.

Организмы поглощают из окружающей среды различные вещества (пища, атмосферный воздух) и выделяют в среду продукты обмена (рис. 3.2).

Итак, живой организм существует только при условии обмена веществ, результатом которого является ассимиляция или диссимиляция.

Рис. 3.1. Простейшая схема метаболизма

АССИМИЛЯЦИЯ (или пластический обмен) – это процесс использования *веществ*, поступающих в организм, для «строительства» его тела.

ДИССИМИЛЯЦИЯ (энергетический обмен) – это процесс использования *энергии,* выделяющейся при окислении веществ, поступающих в организм.

Рис. 3.2. Схема обмена веществ между живым организмом и окружающей средой

§ 3.1.2. Уровни организации живого

Существует несколько уровней организации живого, объединяющихся по принципу «матрешки» (рис. 3.3):

1. *Молекулярный*

Все живое, существующее на Земле, состоит из молекул. Этот факт объединяет живую и неживую составляющие природы. На этом уровне происходят разнообразные процессы жизнедеятельности: обмен веществ, превращение энергии и т. д.

2. *Клеточный*

Биомолекулы, соединяясь друг с другом, образуют первичную структуру – основу всего живого – КЛЕТКУ.

Рис. 3.3. Уровни организации живого

3. *Тканевый*

Ткани – комплексы клеток, и неклеточного живого вещества, развивающиеся из одного зародышевого зачатка и имеющие общее строение и функции. Каждый многоклеточный организм представляет собой «сотканный» природой, уникальный объект, где все виды тканей (нервная, эпителиальная, соединительная, и мышечная), взаимодействуя между собой, образуют органы и системы органов, то есть организуются в следующий 4-й уровень – ***органный***).

5. ***Организменный***

Системы органов (пищеварительная, костная, дыхательная и др.) представляют собой целостный взаимосвязанный *организм*[32].

6. ***Популяционно-видовой***

Живые организмы создают популяции[33].

7. ***Биогеоценотический***

Биогеоценозы – совокупность живых организмов и окружающей среды обитания этих организмов. Более подробно это понятие рассматривается в курсе экологии.

---

[32] Организм может быть одноклеточным – самостоятельной свободноживущей клеткой, либо многоклеточным, т.е. представлять собой совокупность неразрывно связанных систем органов и тканей.

[33] Популяция – совокупность организмов одного вида, объединенная общностью территории, генофонда, экологической ниши.

8. ***Биосферный***

Самый высокий уровень организации жизни на Земле – биосфера. На этом уровне происходит круговорот веществ и энергии, обусловленный жизнедеятельностью организмов, населяющих планету. По ориентировочным оценкам биомасса живого вещества составляет около 3 000 000 000 000 тонн!

---

1. Дайте определение понятию «жизнь». Сформулируйте основные свойства жизни.

2. Что такое организм? Каковы свойства живого организма?

3. Проанализируйте, почему организм называют открытой системой?

4. В чем заключаются особенности метаболизма различных групп живых организмов по типу питания?

5. Что такое «принцип матрешки» в применении к устройству организации живого? Какие выводы можно сделать при его анализе?

§ 3.1.3. Понятие о цитологии

Цитология – раздел биологии, изучающий жизнедеятельность клетки.

Множество простейших и микроорганизмов представляют собой существующие отдельно друг от друга клетки. Тела многоклеточных организмов построены из огромного числа клеток. Независимо от того, представляет собой клетка целостную живую систему, либо ее часть, она наделена набором признаков и свойств, характерных для всех клеток.

Клетка состоит из простых и сложных молекул белков, нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), липидов, углеводов, минеральных веществ и, конечно же, воды. Белкам и нуклеиновым кислотам принадлежит основная роль в синтезе из простых микромолекул сложных макромолекул, в освобождении и превращении энергии из поступающих в клетку веществ.

Клетка – основная структурно-функциональная единица живого. Клетка – биологически автономная система, способная самостоятельно осуществлять все процессы, присущие живой материи (рост, размножение, раздражимость и т. д.)

Впервые клетку наблюдал Р. Гук (1665 г., Англия) на срезах пробки через систему линз. Дальнейшее ведение микроскопических исследований принадлежит члену Королевского общества Неемии Грю (1641–1712 гг.), который собрал первый микроскоп в. Общие результаты своих исследований он изложил в четырехтомном трактате, опубликованном в 1682 г. Трактат этот носил длинное название «Анатомия растений с изложением философской истории растительного мира и несколько других докладов, прочитанных перед Королевским обществом».

Но изучение срезов тканей растительных и животных организмов в 17–18 веках носили описательный характер. Более подробное изучение жизнедеятельности клетки началось с усовершенствованием увеличительной техники в 19 веке. Немецкие ученые М. Шлейден и Т. Шванн (1839 г.) сопоставили ткани растительных и животных организмов, обнаружили общий принцип строения и роста тех и других клеток.

Позднее, благодаря открытию процессов роста и деления, а также ряда биохимических процессов клетки, сформировалась *клеточная теория*.

Основные положения классической клеточной теории:

1. Клетка – наименьшая структурная единица живого.

2. Все живые организмы состоят из клеток (одной – одноклеточный организм, или множества – многоклеточный организм)[34].

3. Несмотря на огромное разнообразие внешних форм, все клетки сходны между собой по внутреннему строению, химическому составу и принципам жизнедеятельности.

4. «Клетка от клетки». Новые (дочерние) клетки возникают в результате деления исходной (материнской) клетки.

Клетки многоклеточного организма объединяются в ткани, ткани – в органы, органы в системы органов.

Все вещества, входящие в состав клетки (и живого организма в целом) принято делить на две группы – группу неорганических веществ и группу органических веществ (рис. 3.4):

Рис. 3.4. Простейшая классификация веществ живых организмов. Неорганические вещества в живой клетке представлены, прежде всего, водой, а также микро- и макроэлементами, присутствующими в составе различных солей

[34] В настоящее время установлено, что вирусы, будучи неклеточными телами, при определённых условиях также проявляют все свойства живых организмов, представляя собой промежуточное звено между живыми и неживыми телами.

Воды в организме содержится, в среднем 83%. Функции воды:

а) Вода является прекрасным растворителем. Вещества, растворенные в воде, проникают в клетку, обеспечивая ее питание.

б) Продукты обмена выводятся из организма также в виде водных растворов (см. раздел «Цитоплазма»).

в) Вода поддерживает тургор (упругость) клетки.

г) Все биохимические процессы (окисление – восстановление, синтез – разложение, каталитические реакции и т.д.) происходят в водной среде.

д) Кроме того, вода обладает большой теплоемкостью и теплопроводностью, что обеспечивает гармоничное распределение и сохранение тепла в организме.

Примеры микро- и макроэлементов приведены на рис. 3.5.

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА ЖИВОГО ОРГАНИЗМА

Макроэлементы

Кислород (65-75%)
Водород (8-10%)
Углерод (15-18%)
Азот (1,5-3%)
Сера (0,15-0,2%)
А также: калий, кальций, магний, натрий, фосфор. Из таких элементов «построено» тело организма На их долю приходится 98% от сухого веса.

Микроэлементы

К микроэлементам относятся элементы, содержащиеся в клетках в ничтожно малых количествах (около 0,001%): железо, медь, марганец, молибден, бор, цинк, йод, кремний и некоторые другие элементы, которые входят в состав гормонов, ферментов, витаминов и др. жизненно важных биохимических веществ, без которых невозможна жизнедеятельность клетки и всего организма в целом

Рис. 3.5. Микроэлементы и макроэлементы живого организма

Органические вещества живой клетки представляют: липиды, углеводы, белки, нуклеиновые кислоты.

Липиды – производные высших жирных кислот, химический состав которых можно представить формулой $C_mH_nO_l$. К липидам, в частности,

относятся жиры, химический состав которых подробно рассматривается в курсе органической химии. При этом, жидкие жиры (масла) чаще растительного происхождения (исключение – рыбий жир), твёрдые – животного происхождения (исключение – пальмовое масло).

Функции липидов:

1. **Строительная**. Липиды входят в состав всех биологических мембран.

2. **Энергетическая.** Липиды являются источником энергии для организма. При окислении 1 г липидов до CO_2 и H_2O выделяется 39 кДж энергии:

$$C_mH_nO_l \xrightarrow{O_2} CO_2 + H_2O$$ [35].

Выделяющаяся при этом вода называется метаболической.

3. **Теплоизоляционная.** Липиды – отличный теплоизолятор. Эта функция играет большую роль при адаптации организмов к холодной среде обитания, например, моржей и тюленей в холодных водоёмах.

4. **Влагообеспечивающая.** Как видно из функции 2, жиры служат дополнительным источником воды в организме. Эта функция особенно важна для обитателей засушливых зон.

Углеводы, входящие в состав живых клеток, подразделяют на простые и сложные (рис. 3.6)

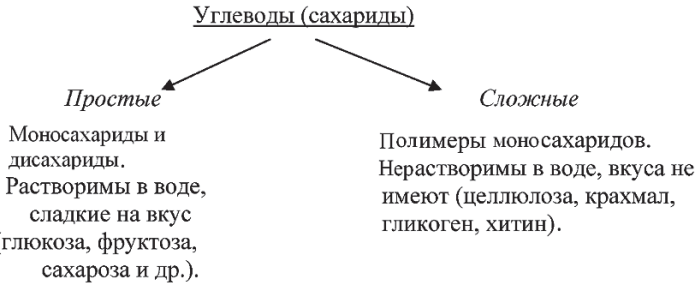


Рис. 3.6. Простейшая классификация углеводов, входящих в состав живых клеток

Функции углеводов:

1. **Энергетическая.** Основным источником энергии для организма являются простые сахариды. Важнейшим из них является глюкоза. При окислении 1 г глюкозы освобождается 17,6 кДж энергии. Некоторые сложные углеводы представляют собой дополнительный запас энергии.

[35] Приведённую схему можно представить более строгим уравнением:
$C_mH_nO_l + kO_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O$, где $2m + \frac{n}{2} = l + 2k$.

В частности, организм получает значительное количество энергии для жизнедеятельности при окислении полимерных молекул крахмала (в телах растений) или гликогена (в телах животных).

2. **Строительная.** Сложные углеводы являются строительным материалом для некоторых живых организмов. Например, целлюлоза входит в состав древесины, а хитин – в наружный скелет насекомых.

Белки – сложные полимеры. На долю белков приходится 50 % от сухой массы живого организма. Белки – уникальная природная форма, из которой состоят все живые организмы планеты. В организме человека встречаются 5 млн типов белков, отличающихся не только друг от друга, но и от белков других организмов. Белки состоят из аминокислот (мономеры), соединенных друг с другом в определенной последовательности, присущей только определенному организму. Всего известно 20 разновидностей аминокислот. В молекуле белка эти аминокислоты соединены друг с другом прочной пептидной связью[36]. В состав 1 молекулы белка входят от 51 до нескольких сотен аминокислот.

Функции белков:

1. **Строительная**. Белки входят в состав всех вещественных биологических структур: клеток, тканей, органов, крови (рис. 3.7).

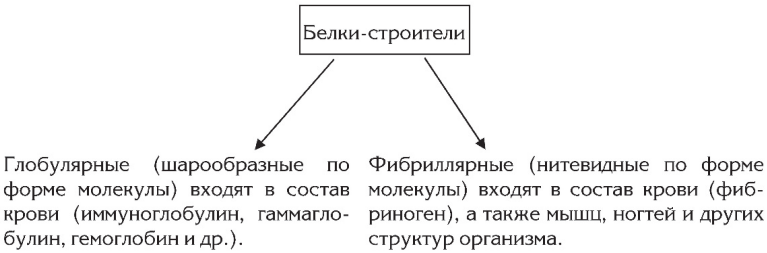


Рис. 3.7. Простейшая классификация белков, реализующих строительную функцию

2. **Каталитическая**. Группа белков, являющихся катализаторами биохимических процессов, называется ферментами. Некоторые ферменты ускоряют протекание реакций в десятки и сотни тысяч раз. Схема работы ферментов с субстратами – веществами, вступающими в биохимический процесс, приведена на рис. 3.8.

3. **Транспортная**. Существует ряд белков, транспортирующих вещества к различным тканям (например, гемоглобин – белок, переносящий кислород к клеткам) и удаляющих продукты обмена. Многие молекулы

[36] Подробно строение молекулы белка рассматривается в курсе органической химии.

(например, сахара) не способны проникнуть в клетку без помощи специфических белков-переносчиков.

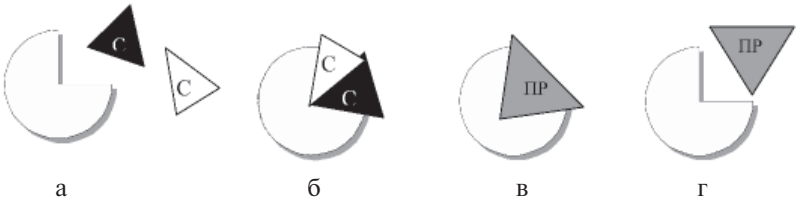


Рис. 3.8. Схема работы ферментов:
а – сближение субстратов (С) с ферментом.; б – образование фермент-субстратного комплекса; в – превращение субстратов в продукты реакции (ПР); г – разъединение продуктов реакции и фермента

4. **Гормональная**. Гормоны – биологически активные вещества, вырабатываемые железами внутренней секреции и регулирующие физиологические процессы в организме. При недостатке гормонов возникают патологические изменения, приводящих к заболеваниям и даже гибели организма. Некоторые из гормонов являются белками.

5. **Защитно-иммунная**. Белки, входящие в состав иммунных клеток (лейкоцитов) обеспечивают защиту от бактерий и вирусов. Эти белки (антитела) связываются с чужеродными организму веществами, образуя комплекс, который затем удаляется из организма

7. **Двигательная**. Некоторые из белков, входящих в состав мышц способны сокращаться, а, значит, приводить организм в движение.

8. **Энергетическая.** Иногда, хотя и достаточно редко, белки могут служить дополнительным источником энергии. При окислении 1 г белка освобождается 17,6 кДж.

Нуклеиновые кислоты в живых клетках представлены двумя типами: дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК) и рибонуклеиновые кислоты (ДНК).

Современная структурная модель ДНК была впервые предложена американским биологом Дж. Уотсоном совместно с английским физиком Ф. Криком в 1953 году и представляет собой две полинуклеотидные цепи, соединённых водородными связями и закрученные в спираль. В каждой цепочке содержится от пятисот до нескольких сотен тысяч нуклеотидов. Условная схема строения нуклеотида представлена на рис. 3.9.

В нуклеотидах ДНК остаток фосфорной кислоты и дезоксирибоза – неизменные составляющие, в то время как азотистых оснований существует 4 разновидности: ***аденин, гуанин, цитозин и тимин***. Поэтому каждый нуклеотид принято обозначать тем же названием, что и азотистое

основание, входящее в его состав (аденин, гуанин, цитозин, тимин). Поскольку водородные связи в ДНК могут возникать только попарно, по принципу комплементарности: аденин (А) связывается только с тимином (Т), гуанин (Г) – только с цитозином (Ц), то, зная последовательность одной цепи, можно составить последовательность второй цепи.

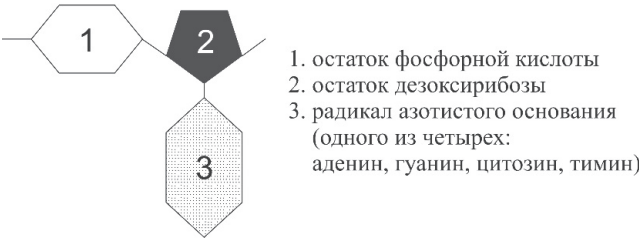


Рис. 3.9. Схема строения нуклеотида ДНК

При определённых условиях, перед делением клетки, ДНК объединяется с многочисленными белками в единый комплекс, который называется ***хромосома*** (рис. 3.10).

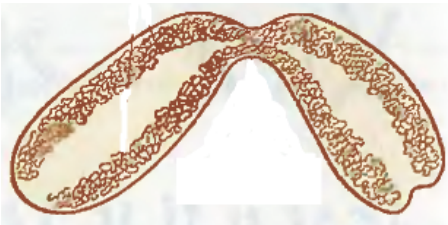


Рис. 3.10. Строение реплицированной (удвоенной) хромосомы

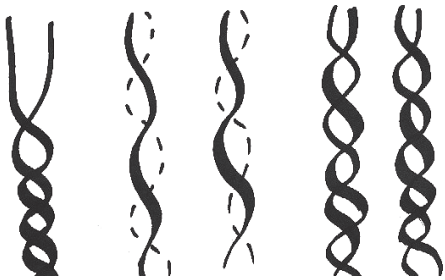
Уникальность дезоксирибонуклеиновой кислоты состоит в том, что её молекула является хранилищем сведений о составе всех белков, вырабатываемых организмом, а, значит, содержит в себе информацию обо всех его внешних и внутренних признаках, причём, передаваемую из поколения в поколение от родителей – потомству. Биологическая передача сведений потомству о своих признаках осуществляется благодаря *репликации ДНК.*

Репликация ДНК – это процесс её удвоения, протекающий с участием специальных ферментов при подготовке клетки к делению. Репликацию можно условно разделить на три стадии (рис. 3.11):

1. Раскручивание двойной спирали ДНК с одного конца под действием фермента.

2. Достраивание по принципу комплементарности новых цепей на разъединившихся прежних цепях.

3. Окончательное формирование двух новых ДНК. В каждой из них одна цепь принадлежала прежней ДНК, а вторая достроена по принципу комплементарности.



а б в

Рис. 3.11. Схема репликации ДНК:
а – раскручивание двойной спирали ДНК; б – достраивание новых цепей на разъединившихся прежних цепях; в – окончательное формирование двух новых ДНК

Таким образом, при делении клетки обе дочерние клетки получают совершено одинаковые ДНК.

Также как и ДНК, молекула рибонуклеиновой кислоты (РНК) представляет собой полинуклеотидную цепь. В отличие от ДНК она одноцепочечная и содержит намного меньше нуклеотидов. Другим существенным отличием РНК от ДНК является химический состав нуклеотидов: нуклеотиды РНК содержат остаток рибозы вместо дезоксирибозы (рис. 3.12) и вместо тимина в составе нуклеотидов РНК находится *урацил*.

Основная функция РНК – участие в синтезе белковых молекул. В зависимости от характера этого участия РНК подразделяют на *матричные или информационные* (мРНК), *транспортные* (тРНК), *рибосомальные* (рРНК):

– мРНК копирует с ДНК информацию о структуре белка, который нужно синтезировать и доставляет её к месту синтеза;

– (тРНК) – доставляет необходимые аминокислоты и в определенном порядке к месту синтеза белка;

– (рРНК) – входят в состав рибосом – внутриклеточных частиц, на которых и происходит синтез белка. Иногда рибосомы называют главными «рабочими» синтеза белка.

Участок ДНК, содержащий сведения о первичной структуре одного определённого белка, называется **геном**. Совокупность всей информации

обо всех белках, хранящаяся в ДНК иногда называют генетической программой. Последовательность нуклеотидов ДНК определяет аминокислотную последовательность молекулы белка. Эта зависимость между молекулой ДНК и строением белковой молекулы называется ***генетический код.*** Генетический код известен для всех 20 аминокислот.

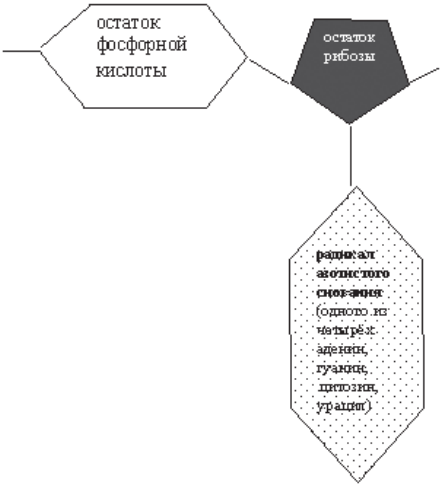


Рис. 3.12. Схема строения нуклеотида РНК

Процесс передачи информации генетического кода в конкретный белок протекает следующим образом:

1. С помощью специальных ферментов на поверхности гена формируется комлементарная цепь матричной РНК. В данном случае ген является матрицей с которой делается сле́пок – м-РНК.

2. Образовавшаяся м-РНК перемещается к месту синтеза белка – к рибосомам.

3. Сюда же к месту сборки белковой молекулы «доставляются» посредством тРНК определенные аминокислоты, последовательность построения которых записана на мРНК. Набору из трёх азотистых оснований, который называется *триплет нуклеотидов* или *кодон*, соответствует одна и только одна аминокислота. Например, возле нуклеотидной последовательности ГГЦ может закрепиться только глицин

$$H_2N–CH_2–COOH,$$

а возле кодона ГЦУ – только аланин

$$H_2N - \underset{\underset{CH_3}{|}}{CH} - COOH$$

Всего в построении белковой молекулы участвует 20 различных аминокислот.

4. Между располагающимися в строго определённой последовательности аминокислотами образуется пептидная связь

$$H_2N - CH_2 - COOH + H_2N - \underset{\underset{CH_3}{|}}{CH} - COOH \longrightarrow H_2N - CH_2 - \overset{\overset{O}{||}}{C} - \overset{\overset{H}{|}}{N} - \underset{\underset{CH_3}{|}}{CH} - COOH + H_2O$$

и постепенно формируется молекула белка. Следует подчеркнуть, что синтез белковых молекул осуществляется при активном участии огромного количества всевозможных ферментов.

---

1. Что такое клетка? В чем заключается ее биологическое значение?

2. В чем заключаются основные положения клеточной теории Шлейдена – Шванна?

3. Какие вещества неорганической природы включены в состав клетки? Объясните их значение.

4. Какое значение для клетки имеют органические вещества: липиды, углеводы и белки?

5. Что такое ДНК? Расскажите о ее строении. Каково значение ДНК для клетки?

6. О чем гласит принцип комплементарности в построении молекулы ДНК? Произвести достройку молекулы ДНК: А-Г-Г-Г-Ц-А-Т-Г-Т-Т-А-Ц-Г-Ц.

7. Задача: в молекуле ДНК 19% цитозина. Определить количество остальных нуклеотидов.

8. В чем биологический смысл репликации ДНК?

9. В чем особенности строения РНК? Какие виды РНК встречаются в клетке и какую функцию осуществляют?

10. Каким образом происходит реализация генетической программы? В чем ее биологический смысл?

§ 3.1.4. Строение клетки

Размеры клетки широко варьируют от 0,1 мкм (некоторые бактерии) до 155 мм (яйцо страуса). У всех клеток, независимо от их формы, размеров, функциональной нагрузки обнаруживается сходное строение (рис. 3.13).

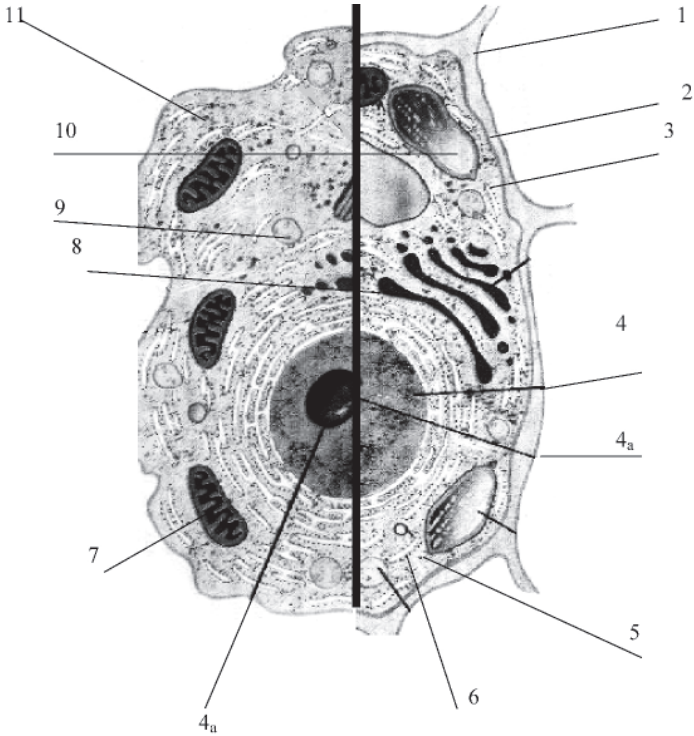


Рис. 3.13. Схема строения живой клетки:
1 – оболочка; 2 – мембрана; 3 – цитоплазма; 4 – ядро; 4а – ядрышко; 5 – рибосомы; 6 – эндоплазматическая сеть (ЭПС); 7 – митохондрии; 8 – комплекс гольджи; 9 – лизосомы; 10 – пластиды; 11 – клеточные включения

Снаружи клетка одета *мембраной*. Внутренняя часть клетки содержит многочисленные ***органоиды*** – структурные образования клетки, выполняющие определенные функции жизнедеятельности клетки.

1. Оболочка. Присутствует только у растительных клеток. Состоит из волокон целлюлозы. Функции оболочки: защита клетки от внешних повреждений, придает стабильную форму клетки, эластичность растительным тканям.

Повреждение наружной оболочки приводит к гибели клетки (цитолиз).

2. Мембрана. Тончайшая структура (75 Å), состоит из двойного слоя молекул липидов и одного слоя белков. Такая структура обеспечивает уникальную эластичность и прочность мембране

Функции мембраны:

- участие в обмене веществ. Эта функция связана с избирательной проницаемостью в клетку определенных веществ и выведение из нее продуктов обмена. В процессе питания в клетку могут проникать определенные растворы веществ *(пиноцитоз)* и твердые частицы *(фагоцитоз)*.

Явление фагоцитоза – поглощение клеткой твердых частиц – впервые было описано русским врачом Мечниковым. Фагоцитарная особенность лежит в основе процесса иммунитета. Особенно развита у лейкоцитов, клеток костного мозга, лимфатических узлов, селезенки, надпочечников и гипофиза.

Пиноцитоз – поглощение клеткой растворов – состоит в том, что мельчайшие пузырьки жидкости втягиваются через образующуюся воронку, проникают через мембрану и усваиваются клеткой.

3. Цитоплазма – внутренняя среда клетки. Представляет собой гелеобразную жидкость (коллоидная система), состоит на 80 % из воды, в которой растворены белки, липиды, углеводы, неорганические вещества. Цитоплазма живой клетки находится в постоянном движении (циклоз).

Функции цитоплазмы:

- транспортировка питательных веществ и утилизация продуктов обмена клетки;
- буферность цитоплазмы (постоянство физико-химических свойств) обеспечивает гомеостаз клетки, поддерживает постоянные нужные параметры жизнедеятельности;
- поддержание тургора (упругость) клетки;
- все биохимические реакции происходят только в водных растворах, что обеспечивается в среде цитоплазмы.

4. Ядро – обязательный органоид эукариотических клеток. Впервые было исследовано и описано Р. Броуном в 1831 г. В молодых клетках расположено в центре клетки, в старых – смещается в сторону. Снаружи ядро окружено мембраной с крупными порами, способными пропускать крупные макромолекулы. Внутри ядро заполнено клеточным соком – *кариоплазмой*, основная часть ядра заполнена *хроматином* – ядерным веществом, содержащим ДНК и белок. Перед делением хроматин образует палочковидные ***хромосомы.*** Причём, хромосомы одинакового строения (но содержащие разные ДНК!) образуют пары, зрительно воспринимаемые как одно целое (рис. 3.14).

Рис. 3.14. Хромосомный набор человеческой клетки перед началом деления

Структурирование всех хромосом в пары свидетельствует о том, что число хромосом – чётное. Поэтому, его часто обозначают 2*n*, где *n – количество хромосомных пар,* а соответствующий набор хромосом называют **диплоидным.** Например, у голубей *n* = 40 (80 хромосом)*, у* мухи *n* = 6 (12 хромосом), у собаки *n* = 39 *(*78 хромосом), у аскариды *n* = 1 (2 хромосомы). У человека *n* = 23 (46 хромосом). Однако, в половых клетках число хромосом в два раза меньше. Поэтому набор хромосом в половых клетках называется **гаплоидным.** Клетки, не являющиеся половыми называются **соматическими.** Иногда клетки с гаплоидным набором хромосом называют гаплоидными клетками, а с диплоидным набором хромосом – диплоидными клетками.

При слиянии двух родительских гаплоидных половых клеток образуется диплоидная клетка, дающая начало новому организму с набором генов отца и матери

Совокупность всех хромосом ядра (а значит и генов) клетки называется **генотип**. Именно **генотип** определяет все внешние и внутренние признаки конкретного организма.

В соматических клетках 44 Х-образные хромосомы (22 пары) у женщин и мужчин идентичны (сходны по строению), их называют *аутосомами. А* 23-я пара имеет конфигурацию XX – у женщин и XY – у мужчин. Эти пары хромосом именуются *половыми хромосомами*.

В половых клетках 22 хромосомы также одинаковые у яйцеклеток и у сперматозоидов, а 23-я хромосома конфигурации X – у яйцеклетки и X или Y – у сперматозоидов. Поэтому при слиянии половых клеток и образовании пар хромосом, 23-я пара будет ({XY} или {XX}) определять пол будущего ребенка.

Необходимо помнить, что хотя в соматических клетках набор хромосом диплоидный (2*n*), однако, перед началом деления клеток происходит репликация ДНК, то есть, удвоение их количества, а, значит, и удвоение

количества хромосом. Поэтому перед началом деления соматической клетки в ней насчитывается 4*n* хромосом (рис. 16). Она становится *тетраплоидной*.

Функции ядра:

– хранение генетической информации;

– контроль за *всеми* процессами, происходящими в клетке: делением, дыханием, питанием и др.

4а. **Ядрышко** – структура, содержащаяся в ядре. Ядро может содержат 1, 2 или более ядрышек. *Функция ядрышка* – формирование рибосом.

Следует отметить, что не все клетки имеют оформленное ядро. Клетки, имеющие ядро называются ***эукариотическими*** или эукариотами**.** Клетки, не имеющие ядра, называются ***прокариотическими*** или прокариотами. Функции ядра у прокариот несёт одна нить ДНК (именуется хромосома), в которой хранится вся генетическая информация. К прокариотам относятся бактерии и сине-зеленые водоросли. Как правило, у прокариотов отсутствуют и некоторые другие органоиды. Размеры прокариотических клеток меньше, чем размеры эукариот.

5. Рибосомы – самые мелкие органоиды клетки. Были обнаружены в 1954 г. Французским ученым Паладом. Рибосомы были обнаружены в цитоплазме, а также на гранулярной ЭПС и в ядре.

Функция рибосом: обеспечение биосинтеза белка.

6. Эндоплазматическая сеть. Представляет собой каналы и полости, ограниченные мембраной. Различают две разновидности ЭПС: гранулярная ЭПС и агранулярная ЭПС. Гранулярная ЭПС морфологически отличается от агранулярной наличием на ее поверхности многочисленных рибосом (на агранулярной ЭПС рибосомы отсутствуют).

Функции эндоплазматической сети:

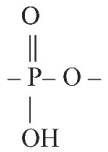
– участие в синтезе органических веществ: на гранулярной ЭПС синтезируются белки, на агранулярной – липиды и углеводы;

– транспортировка продуктов синтеза ко всем частям клетки.

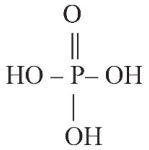
Несложно уяснить, что гранулярная ЭПС характерна для клеток, синтезирующих белки (например клетки желез внутренней секреции), агранулярная ЭПС характерна для клеток-производителей углеводов и липидов (например клетки жировой ткани).

7. Митохондрии – крупные органоиды, состоящие из двойного слоя мембран: наружная – гладкая, внутренняя образует многочисленные гребнеобразные складки – *кристы*. Внутри митохондрии заполнены жидкостью *(матрикс)*.

Функции митохондрий: основная функция митохондрий – обеспечение клетки энергией. Этот процесс происходит за счет синтеза *аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ)* (рис. 3.15), в которой фрагмент



представляет собой остаток фосфорной кислоты H_3PO_4



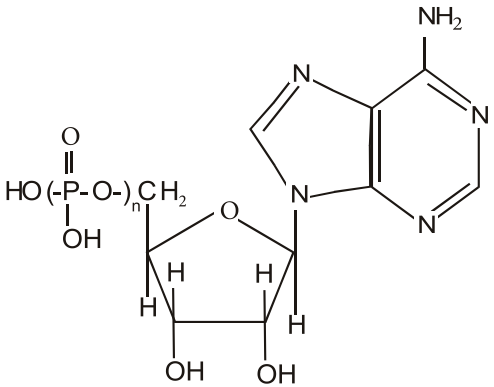


Рис. 3.15. Структурная формула аденозинфосфорных кислот. Для аденозинтрифосфорной кислоты n = 3, для аденозиндифосфорной кислоты n = 2, для аденозинмонофосфорной кислоты n = 1

При взаимодействии молекулы аденозинтрифосфорной кислоты с водой отщепляется один остаток фосфорной кислоты, в результате чего образуется аденозиндифосфорная кислота – АДФ и выделяется огромное количество энергии:

$$АТФ + H_2O = АДФ + H_3PO_4 + 10\ 000 \text{ калорий.}$$

Впоследствии от АДФ может отщепляться еще один остаток фосфорной кислоты, образуя АМФ – аденозинмонофосфорную кислоту.

$$АДФ + H_2O = АМФ + H_3PO_4 + 10\ 000 \text{ калорий}^{37}.$$

[37] Интересно отметить, что приведённые процессы нельзя отнести ни к одному из изученных Вами типов реакций: соединения, разложения, замещения, обмена. К окислительно-восстановительным процессам они также не относятся. Взаимодействие АТФ и АДФ с водой можно отнести к реакциям *расщепления*, характеризующимся тем, что одно из реагирующих веществ вступает в реакцию соединения (в данном случае вода), а другое – в реакцию разложения (АТФ и АДФ).

Освободившаяся энергия используется для жизнедеятельности клетки (КПД процесса превышает 80 %!).

Наряду с распадом АТФ и выделением энергии в клетке постоянно происходит синтез АТФ и накопление энергии (обратные реакции).

Количество митохондрий в клетке зависит от потребности последней в энергии. Так, в клетках кожи человека находится в среднем 5–6 митохондрий, в клетках мышц – до 1000, в клетках печени – до 2500!

8. Комплекс Гольджи. Итальянский ученый Гольджи обнаружил и описал структуру клетки, напоминающую стопки мембран, цистерны, пузырьки и трубочки. Расположена эта система чаще всего возле ядра.

Функции комплекса Гольджи: в полостях комплекса накапливаются всевозможные продукты обмена клетки, которые по каким-либо причинам не вывелись наружу. В последствии эти продукты могут быть использованы клеткой для процессов жизнедеятельности. Из пузырьков и цистерночек комплекса Гольджи в растительных клетках образуются вакуоли, заполненные клеточным соком.

9. Лизосомы – мелкие органоиды. Представляют собой пузырьки, окруженные мембраной. Внутри лизосомы заполнены пищеварительными ферментами (обнаружено 12 ферментов), которые расщепляют и переваривают крупные макромолекулы (белки, полисахариды, нуклеиновые кислоты).

Функции лизосом: растворение и переваривание макромолекул. Лизосомы участвуют в фагоцитозе. Понятно, что основная функция по перевариванию поступающих в клетку частиц принадлежит лизосомам.

10. Пластиды. Эти органоиды характерны только для растительных клеток. Форма напоминает двояковыпуклую линзу. Структура пластид напоминает таковую у митохондрий: двойной слой мембраны. Наружная – гладкая, внутренняя образует складки, называемые *тилакоидами*. На тилакоидах происходит основной жизненно важный для всех зеленых растений процесс – ***фотосинтез***:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{h\nu,\ \text{хлорофил}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

Пластиды бывают трех типов:

1) *Хлоропласты* – зеленые пластиды. Их цвет обусловлен наличием *хлорофилла*. *Хлорофилл* – основное вещество хлоропластов (имеет зеленый цвет). Только благодаря хлорофиллу возможен процесс фотосинтеза (см. раздел 4.2). Хлоропласты придают зеленый цвет растительным организмам.

2) *Хромопласты* – пластиды, имеющие различные окраски: от ярко-желтого до пурпурно-багряного. Наличие различных пигментов окрашивают плоды, цветки и осенние листья растений в соответствующие

цвета. Этот факт особенно важен для привлечения насекомых к цветкам, как природный индикатор созревания плодов и др.

3) *Лейкопласты* – бесцветные пластиды, в которых происходит накопление запасных питательных веществ (например, крахмала).

Некоторые виды пластид могут переходить друг в друга: например, переход хлоропластов в хромопласты: созревание томатов, яблок, вишни, и т.д.; изменение окраски листьев в осенний период времени. Лейкопласты могут переходить в хлоропласты: позеленение картофеля на свету. Это доказывает общность происхождения пластид.

11. Клеточные включения. Вакуоли. Это непостоянные и необязательные составляющие клетки. Они могут появляться и исчезать в течение всей жизни клетки. К ним относятся капли жира, зерна крахмала и гликогена, кристаллы щавелево-кислого кальция и др. Жидкие продукты обмена называются *клеточным соком* и накапливаются они в *вакуолях*. В клеточном соке растворены сахара, минеральные соли, пигменты и т.д. Чем старше клетка, тем больше клеточного сока накапливает клетка. Молодые клетки практически не содержат вакуолей.

Помимо перечисленного некоторые специализированные клетки обладают специальными органоидами. К ним относятся:

– *реснички и жгутики*, представляющие собой выросты мембраны клетки, осуществляющие движения клетки. Они имеются у одноклеточных организмов и многоклеточных (кишечный эпителий, сперматозоиды, эпителий дыхательных путей);

– *миофибриллы* – тонкие нити мышечных клеток, участвующие в сокращении мышц;

– *нейрофибриллы* – органоиды, характерные для нервных клеток и участвующие в проведении нервных импульсов. Кроме того, в состав клеток входят *центриоли* – две (иногда более) цилиндрические структуры диаметром около 0,1 мкм и длиной 0,3 мкм. Место расположения центриолей в период между делениями клетки считается серединой клеточного центра. При делении клетки центриоли расходятся в противоположные стороны – к полюсам, определяя ориентацию веретена деления (рис. 16).

Следует иметь в виду, что, хотя животные и растительные клетки имеют много общего, но между ними существуют и серьёзные различия (табл. 3.1).

Более общая классификация клеток представлена на рис. 3.16.

Одно из основных отличий бактерий от архей, состоит в химическом составе мембраны. Бактерии отделены от внешней среды двойным слоем липидов (жиров и жироподобных веществ). Мембраны архей состоят из терпеновых спиртов.

Таблица 3.1

Отличия растительной клетки от животной

	Признаки	Растительная клетка	Животная клетка
1	Оболочка	Есть	Нет (Мембрана есть)
2	Пластиды	Есть	Нет
3	Клеточные включения	Вакуоли, кристаллы щавелево-кислого кальция, зёрна крахмала	Капли жира, зёрна гликогена
4	Питание	Пиноцитоз (фагоцитоз невозможен из-за наличия плотной оболочки)	Фагоцитоз, пиноцитоз
5	Органоиды движения	Нет	Реснички, жгутики, ложноножки, миофибриллы, нейрофибриллы

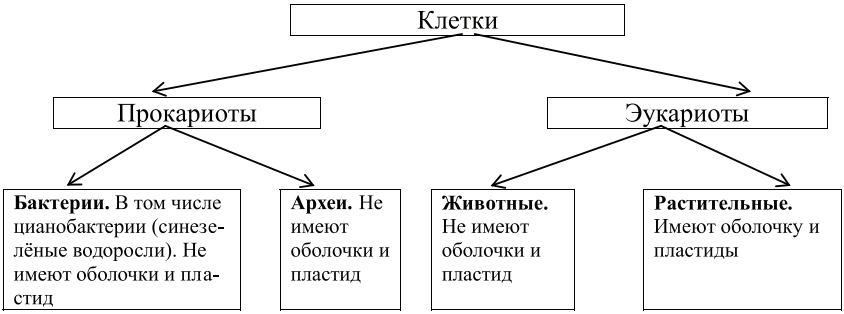


Рис. 3.16. Классификация клеток

При попытке разделить все объекты действительности на живые и неживые выяснилось, что существуют объекты, которые невозможно однозначно отнести ни к живым, ни к неживым. Такие объекты назвали вирусами. Вне клетки они представляют собой неживой химический комплекс ДНК или РНК с молекулами белка. Внутри клетки существование вирусов приобретает форму жизни, то есть они вступают в вещественно-энергетический обмен с содержимым клетки и размножаются.

Таким образом, с учётом живых организмов, классификация всех объектов действительности может выглядеть так, как это представлено на рис. 3.17.

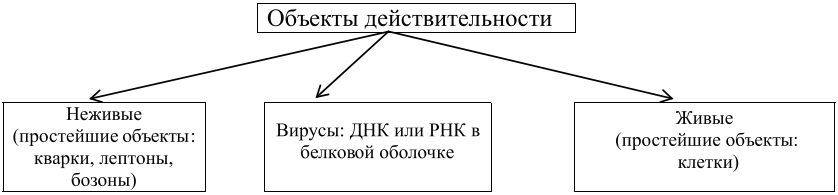


Рис. 3.17. Классификация объектов действительности

1. Обоснуйте утверждение, что ядро – это основная составляющая клетки. Раскройте значение и функции ядра.

2. К какому типу клеток (гаплоидные или диплоидные) относятся следующие примеры: клетка кожи, спора, клетка кожицы лука, клетка печени, сперматозоид, лейкоцит, пыльца, куриное яйцо?

3. В чем состоят основные функции мембранных органоидов: ЭПС, аппарата Гольджи, рибосом и лизосом.

4. Какие существуют виды пластид? Каково их значение для растительной клетки?

5. Что такое митохондрии? Какие процессы в них происходят? Каково их значение?

6. В чем состоят различия между животной и растительной клеткой? Проанализируйте – почему они возникли?

§ 3.1.5. Деление клетки

Когда клетка вырастает до определенных конечных размеров, она приступает к делению. В зависимости от механизма этого процесса выделяют три способа деления: амитоз, митоз и мейоз.

Амитоз. Чаще всего этот способ реализуется в прокариотах. Происходит простое перешнуровывание клетки напополам. Перед этим процессом ДНК реплицируется и каждая клетка получает одинаковую ДНК. Некоторые эукариоты также используют этот процесс (клетки хряща, роговицы глаза, печени).

Митоз. Основной способ деления соматических клеток. Митоз включает 4 фазы: профазу, метафазу, анафазу и телофазу. Период времени между митозами иногда называют интерфазой (рис. 3.18).

Профаза. Хроматин ядра, удвоивший в период интерфазы количество ДНК, спирализуется в хромосомы, количество которых составляет $4n$ ($2n$ пар). Растворяется ядерная мембрана. Центриоли начинают расходиться по полюсам.

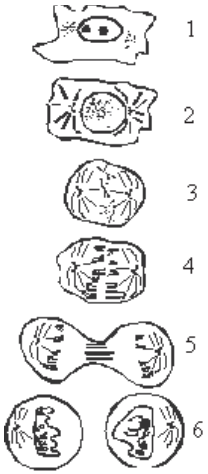


Рис. 3.18. Схема стадий митотического деления клетки: 1 – интерфаза; 2 – профаза; 3 – метафаза; 4 – анафаза; 5 – ранняя телофаза; 6 – поздняя телофаза, начало формирования ядер

Метафаза. Центриоли окончательно расходятся по полюсам клетки. Между центриолями возникают нити – образуется *веретено деления*. Удвоенные хромосомы выстраиваются в центре клетки и прикрепляются к нитям веретена деления.

Анафаза. Хромосомы расходятся по нитям веретена к разным полюсам. Хромосомы распределяются равномерно.

Телофаза. Образуются два одинаковых ядра, хромосомы раскручиваются, образуя хроматин новых клеток. Материнская клетка перешнуровывается напополам.

Подобным образом образуются две дочерние одинаковые клетки, которые будут питаться, расти, и, в свою очередь, делиться.

Мейоз. Это процесс образования гаплоидных клеток. Мейоз идет в два этапа: мейоз I и мейоз II. Каждый из этапов делится на 4 фазы (профаза I, метафаза I, анафаза I, телофаза I, профаза II, метафаза II, анафаза II, телофаза II,). Удвоение числа хромосом происходит один раз, а деление – дважды.

В профазе I происходит попарно соединение материнских и отцовских хромосом (***конъюгация) и*** частичный обмен участками этих хромосом (***кроссинговер***). После кроссинговера измененные хромосомы, содержащие материнские и отцовские гены, расходятся по дочерним клеткам. Вот почему потомки никогда не представляют собой точную копию родителей, а лишь бывают в той или иной мере на них похожи. *Конъюгация и кроссинговер – важнейшие генетические процессы, связанные с изменением наследственных свойств организма.*

В результате мейоза образуются 4 гаплоидные клетки.

§ 3.1.6. Вирусы

Вирусы описаны впервые в 1892 году русским ученым Д.И. Ивановским. *Вирус состоит из* ***1 молекулы ДНК (или РНК),*** *одетой в белковую оболочку* ***(капсид).***

До сих пор вопрос о принадлежности вирусов к живой природе остается дискуссионным. Действительно, многие черты, характерные для живого организма (клеточное строение, питание, дыхание, раздражимость) совершенно отсутствуют у всех групп вирусов. Другие же черты,

характерные для живого, (как то: генетический материал (ДНК), способность размножаться, использовать энергию биогенных веществ) четко проявлены. И всё-таки, большинство биологов склоняются к мнению, что вирусы принадлежат живой природе и представлены самостоятельным царством.

Все вирусы (100%) – паразиты, то есть энергию для размножения и жизнедеятельности используют в готовом виде от хозяина. Паразитируют на генетическом уровне.

Известны вирусы: грипп, полиомиелит, гепатит, корь, энцефалит и лайма, СПИД и др. Многие вирусные болезни и в настоящее время неизлечимы.

Схема работы вируса:

1. Вирус попадает в организм и с помощью рецепторов распознает необходимую клетку. Инфекционный процесс специфичен: например, вирус гепатита проникает и размножается в клетках печени, вирус гриппа – в клетках слизистой оболочки верхних дыхательных путей, вирус энцефалита поражает оболочки головного мозга, ВИЧ – иммунные клетки и т. д.

2. Вирусная частица прикрепляется к клетке и вводит в нее свою ДНК (РНК).

3. ДНК вируса, многократно реплицируясь, порождает все новые и новые частицы, у которых происходит самосборка капсида. Новые вирусные частицы (а их в одной клетке производится несколько тысяч), заражают новые клетки. Этот процесс будет идти либо до тех пор, пока иммунная система не очистит организм от пораженных клеток и, соответственно, от вирусных частиц, либо приведет к гибели организма (ВИЧ).

Наиболее опасным вирусом для организма человека в настоящее время является вирус СПИДа[38]. Его опасность состоит в следующем: попадая непосредственно в кровь (пути проникновения могут быть различны: чаще – половой путь и через инфицированные предметы), ВИЧ распознает и заражает клетки иммунитета (лейкоциты). Размножаясь и поражая все новые и новые клетки, ВИЧ в целом блокирует процесс иммунитета.

---

1. Изложите основные принципы деления клетки. Для чего природа создала процессы конъюгации и кроссинговера в мейозе?

[38] СПИД – синдром приобретенного иммунодефицита. Болезнь вызывается ВИЧ-инфекцией (ВИЧ – вирус иммунодефицита человека).

§ 3.1.7. Размножение организмов

Как уже было упомянуто выше, размножение – одна из основных особенностей живого организма. Существуют два типа размножения: *половое и бесполое*.

Бесполое размножение характеризуется тем, что все потомки происходят от одной особи (материнский организм). Такой тип размножения встречается, чаще всего, у растений, но можно его наблюдать у некоторых беспозвоночных животных (в том числе и простейших).

Существует несколько форм бесполого размножения:

1. Д*еление* – размножение путём разделения материнского организма надвое. Характерно для бактерий, простейших и одноклеточных водорослей.

2. *Спорообразование*. Грибы, низшие растения и многие бактерии способны образовывать одноклеточные образования, из которых прорастает самостоятельный организм – *споры*.

3. Почкование. При такой форме размножения на материнском теле образуется локальное скопление группы клеток в виде бугорка. В последствии, из этих клеток формируется дочерняя особь, которая со временем отделяется от материнского организма. Такая форма размножения характерна для кишечнополостных и дрожжей.

4. *Размножение фрагментами тела*. Уникальная форма бесполого размножения, при котором новый организм появляется из частички материнского организма. Характерно для многих некоторых морских организмов (губки, морские звезды и др.)[39], таким же образом можно размножать дождевых червей и лишайники.

5. *Вегетативное размножение*. Характерно для высших растений. Это способ, при котором дочерняя особь образуется из специализированной части тела материнского организма. Примеров вегетативного размножения немало: это может быть размножение от листовой пластинки (фиалки), от части стебля, который именуется черенок (роза), известно размножение «усами» – ползучими стеблями (земляника), или подземными побегами: луковицами (лилия), клубнями (картофель), корневищем (пырей) и т.д.

6. *Клонирование*. Искусственный метод (в природе не встречается!), изобретенный сравнительно недавно. Может применяться практически ко всем живым организмам, существующим на планете. В этом случае хромосомный набор соматической клетки ($2n$) переносят в яйцеклетку того же организма, лишенную хромосомного материала, и провоцируют

[39] Интересен вариант размножения морской губки: возможно разделить ее тело на множество фрагментов (и даже просеять через сито). Из каждого такого микрофрагмента вырастает отдельная особь.

ее деление. Таким образом реализуется генетическая программа материнского организма без оплодотворения. Клонирование было успешно проведено в различных лабораториях мира для некоторых видов высших животных – лягушек, овец, коров.

Половое размножение. При этой форме размножения происходит слияние генетического материала двух гаплоидных клеток. Половые гаплоидные клетки именуются *гаметами*. Гаметы образуются в результате мейоза; они служат связующим звеном между данным поколением и последующим. При слиянии гамет образуется *диплоидная зигота* – клетка, объединяющая в себе наборы хромосом двух различных особей.

---

1. Что такое прокариоты и эукариоты? В чем состоит их принципиальное различие? Проанализируйте: почему у прокариот отсутствуют митохондрии?

2. Что такое вирусы? Почему вирусы объединены в отдельное царство? Какие виды вирусов вы знаете?

3. Что представляет собой ВИЧ? Почему заболевание ВИЧ всегда имеет летальный исход?

4. В чем состоит суть полового и бесполого размножения? Приведите примеры бесполого размножения.

§ 3.1.8. Понятие о генетике

Генетика – раздел биологии, изучающий законы наследственности и изменчивости живого организма.

Наука и практика к середине 19 века накопили фактический материал сходства и различия организмов, но научной теории долгое время установить не удавалось. Чешский ученый Грегор Мендель в 1865 году провел ряд опытов по скрещиванию различных сортов гороха, впервые открыл и сформулировал закономерности наследственности. Эти опыты впоследствии легли в основу глобального изучения законов наследования и наследственности признаков от поколения к поколению[40]. Рассмотрим основные понятия, необходимые для изучения генетики.

Ген – участок молекулы ДНК, определяющий развитие признака.

Наследственность – свойство родительской пары передавать свои признаки (гены) поколению.

---

[40] Независимо друг от друга в 1900 г. Гуго де Фриз (Голландия), К. Корренс (Германия). Э. Чермак (Австрия), переоткрыли законы Г. Менделя и признали его приоритет.

При бесполом размножении гены передаются посредствам соматических клеток (от 1 родителя), при половом – гены передаются при слиянии 2 родительских половых клеток.

Изменчивость – свойство живых организмов изменять фенотип под воздействием факторов окружающей среды.

Генотип – совокупность генов организма.

Фенотип – совокупность всех признаков организма.

Признак – определенная особенность организма (внешняя или внутренняя). Любой организм обладает совокупностью собственных признаков.

Если гены отвечают за развитие одного признака (парные гены) их называют **аллельными (аллели).**

Фенотип определяется: генотипом и условиями окружающей среды.

Например, представим ситуацию: семена одуванчика, полученные от одного растения (сходный генотип) попадают в разные условия формирования. Одни из них оказываются в лучших условиях с идеальными показателями параметров окружающей среды: температура, влажность, химический состав и т.д. А другие – в худших условиях: засушливый климат, температура среды ниже нормальной и т.д. Впоследствии, сравнив сформировавшиеся растения, мы увидим явные различия, которые указывают на присутствие воздействия окружающей среды.

Гены, определяющие фенотип, могут быть *доминантными* – сильными, подавляющими другие гены, и *рецессивными* – слабыми, подавляемыми. Они также находятся в генотипе, но, при наличии доминантной аллели, как правило, в фенотипе проявлены не будут.

Доминантные гены принято обозначать заглавными латинскими буквами (A, B.....W и т.д.), рецессивные – строчными (a, b.....w и т.д.). Помимо этого в генетике приняты следующие обозначения:

– X – скрещивание родителей;

– $P_{1,2}$ – скрещиваемые родители P_1 и P_2;

– g – гаметы (половые клетки родительской пары);

– F_1 – первое генотипное потомство, полученное при скрещивании пары;

– F_2 – второе генотипное потомство;

– F_n – энное генотипное потомство;

– G – соотношение генотипов потомства, выраженное в долях или процентах;

– Ph – соотношение фенотипов потомства, выраженное в долях или процентах.

Если аллельные гены, определяющие признак, одинаковые (только доминантные АА, либо только рецессивные аа), то такой организм называют ***гомозиготой (чистая линия)***, если разные (Аа) – ***гетерозиготой (гибрид)***.

В табл. 3.2 приведены результаты опыта, проведенного Г. Менделем (левая колонка) и оценим эти результаты с точки зрения теории передачи генетической информации (правая колонка).

Таблица 3.2

Опыт Г. Менделя по скрещиванию гороха
(моногибридное скрещивание)

Опыт 1 X Скрестили 2 сорта гороха: желтый и зеленый (чистая линия, гомозиготы)	$P_{1,2}$: AA X aa g : A; A | a; a
Результат опыта 1 Получили в 1 поколении-все желтые(гетерозигота)	F_1 : Aa (гибрид)
Опыт 2 X Скрестили 2 гетерозиготы	$P_{3,4}$: Aa X Aa g : A; a A; a
Результат опыта 2 Во 2 поколении получили расщепление признаков по фенотипу: ¾ : ¼	F_2 : AA; Aa; Aa; aa Ph : ж; ж; ж; з

На основании результатов первого опыта был сформулирован *I закон Менделя (закон единообразия гибридов первого поколения), который гласит:* ***при скрещивании 2 родительских форм, отличающихся друг от друга по одному признаку, все потомство будет носить признаки одного из родителей – носителя доминантных генов.***

На основании результатов второго опыта был сформулирован II Закона Менделя *(закон расщепления признаков)*: **при *скрещивании двух гетерозиготных особей в поколении наблюдается расщепление признаков 3:1 по фенотипу и 1:2:1 по генотипу.***

Скрещивание родителей, отличающихся по одному признаку, называется *моногибридным*; отличающихся по двум признакам – *дигибридным*; по трём признакам – *тригибридным* и т. д.

Пример решения задачи

Определить все возможные генотипы и фенотипы потомства, полученного при скрещивании желтого и зеленого сортов гороха, а также вероятность появления каждого из них, если известно, что желтоплодное растение – гетерозигота. (Условия остаются прежними: желтый цвет плодов определяется доминантными генами, зеленый – рецессивными).

Решение:

Буквами A и a будем обозначать ген цвета, а буквами B и b ген других признаков

Дано:	*Решение*
A – жёлтый цвет (ж) A – зелёный цвет (з) P_1 – Aa P_2 – aa	$P_{1,2}$: Aa X aa g: A ; a a ; a F_1: Aa ; Aa ; aa ; aa
G – ? Ph – ?	**G: Aa(0,5(50%)); aa(0,5(50%))** **Ph: ж (0,5(50%)); з(0,5(50%))**

Ответ: G: Aa(0,5(50%)); aa(0,5(50%))
Ph: ж (0,5(50%)); з(0,5(50%))

Задачи для самостоятельного решения

1. У кукурузы желтый цвет початков – доминантный признак, белый цвет – рецессивный признак. Определить F_1 при скрещивании желтоплодных гетерозиготного и гомозиготного сортов. Какой процент получения белоплодной кукурузы при скрещивании 2 гетерозиготных растений?

2. Определить *G* и *Ph* родительской пары норок, если из 5 родившихся норок 3 – коричневые, 2 – серебристые. Серебристые норки рецессивны.

3. У человека монголоидный разрез глаз – доминантный признак. Возможно ли рождение детей с европейским типом глаз (рецессивный), при браке 2 разных по фенотипу родителей?

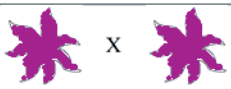
§ 3.1.9. Неполное доминирование

Иногда доминантные аллели некоторых организмов могут проявлять себя не в полной мере и испытывать воздействие рецессивных аллелей. В результате гетерозиготное потомство оказывается с фенотипическими признаками обоих родителей. Такие случаи в природе не редки.

Классическим примером может служить растение ночная красавица: при скрещивании 2 растений с альтернативными признаками (растение с красными цветками – определено доминантными генами и растение с белыми цветками – носители рецессивных генов) гибридное потомство (Аа) будет иметь цветки розового цвета (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Опыт скрещивания при условии неполного доминирования

Опыт 1 Скрестили 2 растения ночная красавица: с красными и белыми цветками (чистая линия, гомозиготы)	$P_{1,2}$: AA X aa g : A; A a; a
Результат опыта 1 Получили в поколении - все растения с розовыми (гетерозигота) цветками	F_1 : Aa (гибрид)
 Опыт 2 Скрестили 2 гетерозиготы	$P_{3,4}$: Aa X Aa g : A; a A; a
 Результат опыта 2 Во 2 поколении получили расщепление признаков по фенотипу: ¼, ½, ¼.	F_2 : AA; Aa; Aa; aa Ph : к, р, р, б

Задача по теме для самостоятельного решения

У растения ночная красавица красный цвет цветков доминирует над белым. Определить % появления цветков розового цвета (гетерозигота) при скрещивании:

а) белоцветковых и красноцветковых растений;

б) белоцветковых и розовоцветковых растений;

в) 2 розовоцветковых растений.

§ 3.1.10. Дигибридное скрещивание

Рассмотрим вариант, когда родители отличаются между собой не по 1, а по 2 парам альтернативных признаков. Такой опыт был проведен Г. Менделем с горохом, семена которого отличались друг от друга не только цветом, но и формой. Понятно, что гены, определяющие округлую форму и желтый цвет – доминантные, гены, определяющие зеленый цвет и морщинистую форму – рецессивные (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Опыт Г. Менделя по скрещиванию гороха. Дигибридное скрещивание

Опыт 1 X Скрестили 2 сорта гороха: желтый и зеленый (чистая линия, гомозиготы)	$P_{1,2}$: AABB X aabb g : AB; AB ab; ab
Результат опыта 1 Получили в 1 поколении - все желтые (гетерозигота)	F_1 : AaBb (гибрид)
Опыт X Скрестили 2 гетерозиготы	$P_{3,4}$: AaBb X AaBb g : AB, Ab, aB, ab; AB, Ab, aB, ab
Результат опыта 2 Во 2 поколении получили расщепление признаков по фенотипу: 9:3:3:1.	* см. следующую таблицу (таблицу Пеннета)

Для того, чтобы просмотреть различные возможные варианты встречи гамет, воспользуемся так называемой решеткой (таблицей) Пеннета (табл. 3.5).

Сопоставляя различные варианты встречи гамет, получаем возможные генотипы и фенотипы в F_2.

В данном случае, в F_2 получили расщепление признаков по фенотипу: 9:3:3:1.

Если проанализировать опыт, то соотношение расщепления окажется 3:1, соотношение признаков по цвету – также 3:1. Отсюда был сформулирован *III закон Менделя (закон независимого наследования):* ***при скрещивании особей, отличающихся друг от друга по 2 и более парам альтернативных признаков, гены и соответствующие признаки наследуются независимо друг от друга.***

Таблица 3.5

Решетка (таблица) Пеннета

P_1 \ P_2	AB	Ab	aB	ab
AB	AABB	AABb	AaBB	AaBb
Ab	AABb	AAbb	AaBb	Aabb
aB	AaBB	AaBb	aaBB	aaBb
ab	AaBb	Aabb	aaBb	aabb

Задачи для самостоятельного решения

1. У томатов круглая форма и красный цвет плодов доминируют над овальной формой и желтым цветом плодов. Определить возможные G и Ph при скрещивании:

а) красноплодных круглых и желтоплодных круглых (гомозиготы) сортов

б) желтоплодного круглого и красноплодного круглого (гетерозиготы) сортов.

2. Черные прямые волосы человека – доминантные признаки, волнистые светлые волосы являются рецессивными признаками. Определить возможные фенотипы потомства при браке, если:

– отец русоволосый, волосы прямые;

– мать черноволосая, волосы вьющиеся и гомозиготна по обоим признакам.

Рассмотреть все возможные варианты гомозиготы и гетерозиготы по форме волос.

3. Возможно ли получить в потомстве (а если возможно, то какой % рождения) белых пушистых хомячков при скрещивании 2 золотистых гладкошерстных хомячков, если гладкошерстность и золотистый цвет – доминантные признаки?

§ 3.1.11. Взаимодействие генов

Определенные признаки могут развиваться и под влиянием нескольких генов. Бывают следующие формы взаимодействия неаллельных генов: ***комплементарность, эпистаз и полимерия.***

Комплементарное действие генов. При взаимодействии неаллельных доминантных генов может возникать новый признак: например при скрещивании душистого гороха с белыми цветками возникло потомство, имеющее цветки пурпурного цвета.

Эпистаз. Один неаллельный доминантный ген может подавлять другой такой же при встрече в одном генотипе: например ген А подавляет действие гена В (А «сильнее» В).

Полимерия. Несколько доминантных генов, накапливаясь в генотипе, могут усиливать проявление данного признака (например, ген негроидной окраски кожи человека: чем больше накапливается доминантных генов, определяющих темный цвет кожи, тем более темнокожим будет человек).

Таким образом, изучение наследования и взаимодействия генов показывает сложность механизма работы генотипа. Получается, что генотип – система действующих друг на друга генов, определяющая бесчисленное многообразие признаков объектов живой природы.

У любого организма множество различных признаков, однако, количество генов невелико. Следовательно, в 1 хромосоме находится несколько генов. О том, как наследуются признаки, локализованные в одной хромосоме, говорит закон американского генетика Томаса Моргана: *гены, находящиеся в одной хромосоме, наследуются совместно*. Такие гены называют ***группой сцепления***.

В качестве примера можно рассмотреть наследование монголоидного разреза глаз и такого признака как черные прямые волосы: группа сцепления – доминантные гены, находящиеся в одной хромосоме.

Таким образом, третий закон Менделя срабатывает только в том случае, когда гены, определяющие конкретный признак, находятся в разных (негомологичных) хромосомах.

Вспомним, что клетки человека содержат 23 пары хромосом, из которых 22 – одинаковы по качеству как у мужчин, так и женщин. 23-я пара XX – женские половые хромосомы, XY – мужские половые хромосомы. Если аллели, определяющие тот или иной признак локализованы в половых хромосомах, то речь идет о наследовании, сцепленном с полом. В половой X-хромосоме человека существуют гены, определяющие некоторые признаки, например, некоторые болезни. Дальтонизм – болезнь нарушения цветовосприятия; судорожные расстройства организма; болезнь, связанная с несвертываемостью крови – гемофилия и др.

Проследим передачу такого признака как гемофилия (болезнь несвертываемости крови) H – доминантный ген, определяющий нормальную свертываемость крови. h – ген, определяющий развитие болезни гемофилия. (Y-хромосома не гомологична X-хромосоме, поэтому такого гена в ней нет):

Рассмотрим вариант, когда в браке женщина-носительница гемофилии (болезнь не проявляет себя из-за доминантного гена нормальной свертываемости) и здоровый мужчина.

$P_{1,2}$: X_HX_h x X_HY

g: X_H, X_h | X_H, Y

F_1: X_HX_H, X_HX_h, X_HY, X_hY

Из опыта видно, что в потомстве (где, кстати, вероятность рождения особей мужского пола и женского равны) вероятность рождения абсолютно здоровых детей 50 %, 1/4 потомков будут носителями гена гемофилии (женского пола) и 1/4 (мальчики) вероятность рождения больного гемофилией.

У кошек, например, в половых хромосомах локализованы гены, определяющие характер окраски шерсти. При этом самки кошек могут иметь так называемый «черепаховый окрас»: пятнистое сочетание белого, рыжего и черного цветов.

Задачи по теме раздела для самостоятельного решения

1. Возможно ли получение «черепахового» окраса самцов кошки?
2. Определить потомство при скрещивании домашней кошки:
1) рыжей и черной;
2) рыжей и черепаховой;
3) черной и черепаховой,
если ген, определяющий черную окраску кошек – доминантный, а ген, определяющий рыжую окраску кошек – рецессивный.

---

1. Что такое генетика? Что она изучает? Дайте ее основные определения.

2. О чем гласят I и II Законы Менделя? Приведите примеры опытов и объясните их с точки зрения Законов Менделя.

3. В чем состоит принципиальное различие между полным и неполным доминированием генов?

4. Сколько генотипов и сколько фенотипов может образоваться при скрещивании двух гетерозигот? двух гомозигот? гетерозиготы и гомозиготы? Рассмотрите этот вопрос для моногибридного, дигибридного и тригибридного скрещивания.

5. Существуют ли отступления от Законов Менделя? В следствие чего они возникают? Расскажите о взаимодействии генов и возникающих в связи с этим частных явлениях.

6. Что такое сцепленное наследование и наследование сцепленное с полом? Какие признаки могут передаваться сцеплено?

§ 3.1.12. Селекция. Биотехнология. Генная инженерия

Селекция – наука о создании новых и улучшении существующих сортов растений и пород животных. Она возникла на основе практической деятельности человека в области сельского хозяйства. Существующие ныне культурные растения и домашние животные – результат одомашнивания их диких предков человеком. Культуры выводятся с определенной целью получить необходимое хозяйственное качество, важное для человека.

Самым древнейшим методом селекции следует считать *бессознательный отбор*. Человек, желая культивировать растения или размножить животных в качестве семенного материала выберет наиболее плодовитых и жизнеспособных особей, с наиболее важными для него хозяйственными качествами (например, среди яйценосных кур он для размножения отберет самых плодовитых здоровых родителей; при выборе растения для получения от него семян он выберет самое крупное растение, с обильным урожаем и т. д.).

Попытки выведения новых пород животных и сортов растений предпринимались еще в древности. В Египте и Месопотамии задолго до новой эры выводили мулов путем искусственного скрещивания осла и лошади, переопыляли финиковую пальму и получали первые гибриды, которые давали большие урожаи по сравнению с их дикими предками.

Селекция приобрела статус науки в 19 веке. Предпосылки этому послужили работы Ч. Дарвина о движущих силах эволюции.

Глубокий анализ мировых растительных ресурсов в свое время был проведен советским генетиком Н.И. Вавиловым. Многочисленные экспедиции дали основания определить центры происхождения многих культурных растений. Вавилов установил 8 таких центров:

Индийский – родина риса, сахарного тростника, цитрусовых;

Среднеазиатский – родина мягкой пшеницы, гороха, бобовых;

Китайский – родина хлебных злаков, проса, гречихи, сои;

Переднеазиатский – родина пшеницы, ржи, многих видов фруктовых деревьев;

Средиземноморский – родоначальник многих овощей;

Абиссинский (Африка) – родина твердых пшениц, ячменя, кофе;

Южноамериканский – дает начало расселению кукурузы, хлопчатника, какао;

Южномексиканский – дал миру картофель и табак.

В этих центрах сосредоточено наибольшее количество сортов, разновидностей, мутаций. Трудами экспедиций Н.И. Вавилова была собрана коллекция, насчитывающая несколько сотен тысяч мировой коллекции растений, что послужило прекрасной базой для выведения новых сортов.

Новые породы домашних животных также выводились с древнейших времен от диких предков. Человек вывел многочисленные виды животных из небольшого числа их предков:

Волки и шакалы – родоначальники собак;

Европейский тур – дал начало крупному рогатому скоту;

Европейский муфлон – предок овец;

Дикий кабан – предок свиней;

Дикая лошадь – предок современных пород лошадей

Индийский петух – родоначальник современных пород кур;

От дикой утки произошли все существующие домашние виды уток и т.д.

В настоящее время селекция животных проводится по тем же принципам, что и селекция растений.

Большой вклад в селекцию растений внес выдающийся селекционеров И.В. Мичурин. В своих работах он использовал три основных форм воздействия на растительные организмы: *гибридизацию, воспитание гибрида и отбор*.

Гибридизация – метод скрещивания двух сортов растений, с целью получения *гибрида*, обладающего ценными хозяйственными качествами обоих родителей. Естественно, что в природных условиях возникновение гибрида невозможно (разные виды в природе не скрещиваются между собой), поэтому приходилось преодолевать нескрещиваемость различными методами (например, опыление рыльца пестика смесью пыльцы). И.В. Мичурин скрещивал подобным образом уссурийскую дикую грушу (мелкие плоды, но зимостойкая) и южный сорт (плоды крупные, сочные, но растение теплолюбивое). У гибрида появились нужные селекционеру качества: полученный сорт Бере зимняя выдерживает температуру атмосферы до – 36 °С, давая в осенний период времени хороший урожай крупных плодов. Кроме скрещивания близкородственных форм И.В. Мичурин применял метод *отдаленной гибридизации* – т. е. скрещивание разных видов и родов растений. Таким образом были получены церападусы (гибриды вишни и черемухи), тернослива (гибрид сливы и терновника) и др. интересные разновидности гибридов.

При *воспитании* гибридов растительных культур И.В. Мичурин адаптировал молодые саженцы растений к изменениям условий окружающей среды (например воспитание теплолюбивых растений к условиям низких температур). Чаще всего в воспитании использовался метод *прививки:* сеянец воспитуемого растения прививался к растению-ментору (ментор – растение-воспитатель заданных качеств). Таким образом удалось получить некоторые сорта южных растений, адаптированных к условиям северных регионов.

Отбор – это древнейший метод, который применялся человеком бессознательно и давал хорошие результаты. И.В. Мичурин применял этот метод к семенам гибридов (отбирались семена самые крупные и правильной формы) от самых жизнеспособных и плодовитых растений.

Таким образом, применяя методы гибридизации, воспитания и отбора, Мичурин вывел сотни новых сортов растений, приспособленных к различным климатическим зонам и обладающих поразительной урожайностью, устойчивостью к заболеваниям и высокими вкусовыми качествами плодов.

Методы гибридизации, воспитания и отбора существуют также и в селекции животных. Пример соблюдения этих принципов в селекции животных – работы М.Ф. Иванова по выведению и адаптации новых пород свиней. Применение искусственного осеменения при отдаленной гибридизации позволили получить сильных и выносливых мулов (гибрид кобылицы и осла), архаромериносов (гибрид тонкорунных овец и горных архаров), гибридов яка и крупного рогатого скота, гибридов кур, обладающих поразительной яйценоскостью и т.д., а воспитание способности противостоять местным неблагоприятным факторам окружающей среды дало возможность расселять таких гибридов повсеместно.

Открытия генетики и молекулярной биологии широко применяются для получения новых форм растений, животных, микроорганизмов. В настоящее время применяют 4 основных метода: *метод гетерозиса, метод полиплоидии, мутагенез, генная инженерия.*

1. Метод гетерозиса

Под гетерозисом подразумевают усиление жизнеспособности за счет скрещивания разных пород животных (или разных сортов растений). В первом поколении гибридов наблюдается мощное развитие. Оно объясняется взаимодействием благоприятных доминантных генов. Подобным образом получено множество сортов растений, обладающих рядом ценных свойств. Метод гетерозиса широко применяется и в селекции животных. Межпородное скрещивание приводит к резкому подъему продуктивности гибридов.

2. Полиплоидия

Полиплоидией называют увеличение гаплоидного набора хромосом. На клетки растений, подготовленные к делению, воздействуют специальными веществами. Клетки перестают делиться, однако число хромосом в них увеличивается вдвое, вчетверо и т. д. Такие крупные клетки дают начало полиплоидным растениям: тетраплоиды (4*n*), гексаплоиды (6n) и т. д. В результате были получены полиплоидные яблони, груши, гречиха, рожь, пшеница, томат и многие другие сорта, приносящие удивительно крупные плоды. Урожайность с одного растения-полиплоида во много раз превышала урожайность его дикого предка.

Метод полиплоидии используется только в селекции растений.

3. Мутагенез

Мутагенез – это метод воздействия на клетки растений различными мутагенами: химические вещества, облучение радиацией и т. д. Эти воздействия изменяют структуру ДНК, и, соответственно, свойства организма. Вредные изменения выбраковываются, а полезные закрепляются и используются в селекции.

В селекции микроорганизмов в основе своей применяют метод мутагенеза. Мутагены изменяют структуру ДНК прокариот, появляются мутантные бактерии с новым характером белков, а значит и признаков.

4. Генная инженерия

Генная инженерия – это совокупность приёмов, методов и технологий получения рекомбинантных РНК и ДНК, выделения генов из организма (клеток), осуществления манипуляций с генами и введения их в другие организмы. Генетическая инженерия не является наукой в широком смысле, но является инструментом *биотехнологии*.

Биотехнология – использование живых организмов и биохимических процессов в производстве.

С древних времен человек использовал микроорганизмы в таких видах производств, как: хлебопечение, пивоварение, сыроварение, виноделие и др.

В настоящее время, помимо пищевой промышленности, достижения биотехнологии с успехом применяются в сельском хозяйстве – как экологически безопасное средство борьбы с вредителями выращиваемых культур, сорняками, болезнями растений. Разработаны промышленные методы получения аминокислот и белков, используемые в качестве кормовых добавок в животноводстве. Кроме того, специфические штаммы[41]

[41] Штамм – чистая культура микроорганизмов одного вида.

используются для очистки сточных вод: благодаря особому виду бактерий полностью очищаются сточные воды городских канализаций. Возможна очистка вод и от синтетических неразлагающихся отходов за счет специальных искусственных штаммов микроорганизмов, полученных в результате мутагенеза.

В медицине благодаря биотехнологии получены многие разновидности антибиотиков (производятся бактериями и грибами), гормонов, ферментов и других биоактивных веществ. Получение вакцин и антител позволяют предупредить и излечить многие опасные заболевания.

Развитие биотехнологии и генной инженерии позволяют получать ранее недоступные препараты, как например: инсулин, гормон роста человека, интерферон и др. Широкое распространение получили так называемые *гибридомы* (гибридные клетки) и продуцируемые ими антитела, используемые в качестве уникальных реагентов. Их применение позволяет получать новые данные о функционировании генетического аппарата клеток.

Биотехнология и генная инженерия – науки, которые в современном мире продолжают активно развиваться, постоянно создавая новые открытия и достижения во благо человечеству.

---

1. Что такое селекция и что она изучает?

2. Приведите примеров центров возникновения современных культурных сортов растений и пород животных.

3. Какими методами селекции (сознательными и бессознательными) пользовались люди в прошлые времена?

4. Какие методы селекции используются в современное время?

5. Какие методы селекции являются новейшими? Какие методы, на ваш взгляд, являются наиболее перспективными в селекции будущего?

6. Что такое биотехнология и генная инженерия? Какие вещества получают при помощи достижений этих наук?

3.2. Неклассическая и постнеклассическая биология

§ 3.2.1. Развитие представлений об эволюции

Рассмотренная выше классическая биология рассматривает всё многообразие живых организмов – растительных и животных – как неизменяемое в природе явление. Поэтому началом неклассической биологии считается создание эволюционной теории Ч. Дарвина, согласнокоторой живые организмы на протяжении тысяч и миллионов лет развивались в процессе естественного отбора. Следует подчеркнуть, что до настоящего времени

единой общепризнанной теории эволюции, исчерпывающе объясняющей последовательность этапов развития живой природы и происхождения человека, нет. Поэтому, приведённый ниже материал является лишь кратким обзором представлений об эволюции, которые, сменяя друг друга, являлись господствующими в определённые исторические периоды.

Еще античные философы выдвигали идеи об изменяемости окружающего мира и живых организмов в нем: Лукреций, Демокрит, Гераклит и др. умозрительно делали заключения о влиянии природных условий на расселение растений и животных.

После длительного застоя науки, царившего в средневековье, естествознание стало бурно развиваться и со временем возникла потребность обобщить накопленный разрозненный материал в единую систему научных знаний. Шведский ботаник Карл Линней в своей работе «Система природы» (начало 18 века) предложил систематизацию растительного и животного мира. Впоследствии французский ученый Жорж Кювье подробно описал приспособления животных к природным условиям. Однако, эти учёные, неизмеримо обогатив науку знаниями о разнообразии современной им живой природы, сделали существенный шаг назад по сравнению с античными философами. Они отрицали изменяемость видов, а, значит и процессы эволюции. Во многом, благодаря трудам К. Линнея и Ж. Кювье в 18 веке господствовало мнение, что на первозданную картину мира могут повлиять только катастрофы и катаклизмы и ничто другое не может её изменить.

Первую *теорию* естественного развития выдвинул в начале 19 века французский натуралист Жан-Батист Ламарк в книге «Философия зоологии». Ламарк систематизировал виды, предложив градацию от простого к сложному («лестница существ»). Этот ряд начинается простейшими и заканчивается наиболее совершенными формами жизни. Он полагал, что усложнение форм происходило за счет изменений условий жизни. Именно Ламарк впервые выдвинул гипотезу происхождения человека от обезьян на основании близости строения тела обезьян и человека. Ввёл термин «Биология». Заслуга Ламарка состоит в попытке объяснить современную природу как результат длительного исторического развития. При этом он основной причиной развития считал стремление организмов к совершенствованию.

Английский натуралист Чарльз Дарвин (середина 19 века) проведя обширные геологические, зоологические и ботанические исследования, пришёл, как и Ламарк, к выводу о несостоятельности теории постоянства видов. Однако, причиной развития Ч. Дарвин считал не стремление организмов к совершенствованию, а *естественный отбор,* осуществляемый в *борьбе за существование*.

Тем самым Ч. Дарвин положил начало неклассической биологии. По мнению Ч. Дарвина выживает и даёт потомство только тот организм, который наиболее приспособлен к данным условиям среды[42] и конкурентной борьбе с другими организмами за источники питания, благоприятное место обитания, возможность продолжения рода.

Таким образом, *естественный отбор это процесс сохранения и размножения особей, наиболее приспособленных к окружающей среде*[43].

Для того чтобы выжить и оставить потомство все организмы ведут *борьбу за существование*. Дарвин выделил 3 формы борьбы: *межвидовая, внутривидовая и борьба с условиями окружающей среды*.

Межвидовая борьба заключается в различных видах конкуренции за право существования *между разными видами*, *внутривидовая* – за право существования *внутри одного вида*. Однако, большая часть живых организмов погибает в борьбе с *условиями окружающей среды* (например, огромное количество растений и животных погибает при заморозках или засухе).

Таким образом, Ч. Дарвин представлял историю возникновения новых видов как длительный процесс накопления полезных (целесообразных) изменений признаков в борьбе за выживание. Согласно его представлениям, эти полезные изменения накапливались, закреплялись в генотипе и передавались из поколения в поколение. В процессе эволюции из одного первоначального признака возникали несколько новых. Такой процесс получил название *дивергенции*. *Дивергенция* – расхождение признаков, возникшее в результате эволюции. Из измененных признаков, в свою очередь, возникал другой ряд измененных признаков и т. д. Так, шаг за шагом, возникали всё большие различия между разными признаками, перерастающие в конечном итоге, в различия между видами, родами, семействами и т. д. Человек, как вид, согласно этому учению, произошёл от обезьян, которые, приспосабливаясь к окружающей среде, развили свой интеллект, научились прямо ходить, разговаривать, изготавливать орудия труда.

Представления Дарвина оставалась господствующими на протяжении всего 20 столетия. Однако, последние достижения науки выявляют всё большие недостатки его теории.

Прежде всего, это чрезвычайно низкая вероятность *целесообразной* генотипической изменчивости. Действительно, согласно современным представлениям, изменения фенотипа, накапливаемые особью в течение

[42] Например, на Аляске, где очень сильные ветры, приспособились к обитанию и размножились воробьи с укороченными крыльями, у особей с обыкновенными крыльями был больший риск сломать крылья во время полета и погибнуть.

[43] Подразумевается, что другие особи являются частью окружающей среды.

жизни, благодаря модификационной изменчивости, (например, мозолистые ладони от постоянного ручного труда) не приводят к изменениям генотипа, закрепляющего эти изменения в потомстве. Комбинативная изменчивость также не может обеспечить эволюционный процесс, поскольку обусловлена лишь комбинацией родительских генотипов и не может стать источником принципиально новых признаков. Остаётся только мутационная изменчивость, которая представляет собой случайные изменения генотипа под воздействием мутагенов. При этом, количество *возможных* мутаций оказывается практически бесконечным. А вероятность целесообразной (полезной) мутации равной приблизительно вероятности набора текста «Войны и мира» обезьяной, случайно ударяющей по клавишам клавиатуры.

Кроме того, всё большее количество археологических находок свидетельствует о том, что немало живых организмов, являющихся предшественниками организмов современных, были лучше приспособлены к окружающей среде нежели их далёкие потомки. Например, древнейшая вымершая птица подкласса ящерохвостых – археоптерикс имела на крыльях цепкие лапки, дававшие ей значительно бóльшую возможность в ловле добычи и удерживании на деревьях, по сравнению с современными птицами (рис. 3.19).

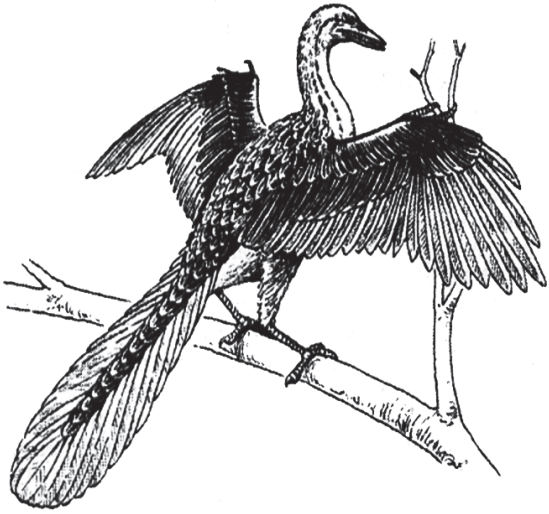


Рис. 3.19. Археоптерикс. Птица, размером с сороку, жившая в юрском периоде (≈185–130 млн. лет назад)

Антропогенезис – процесс исторического развития человека как вида, также не имеет на сегодняшний день единого толкования. Результаты сопоставления генотипов человека и обезьян однозначно свидетельствуют о нашем близком родстве с этими животными. Но не все учёные считают это убедительным доказательством происхождения человека от обезьяны, полагая, что эволюция могла иметь и противоположное направление от человека к обезьяне. При этом фенотип людей, являющихся общими предками для нас и обезьян, существенно отличался от фенотипа современного человека и был близок к ископаемым обезьянам. Таким образом, наряду с Дарвиновскими представлениями, существует точка зрения, согласно которой, биологическая эволюция человека представляла собой не происхождение от обезьяны, но самостоятельный процесс, результатом которого стал его современный облик. То есть, человек никогда не был животным. Отказ от Давиновских представлений об эволюции, как результате борьбы за существование стал одним из аспектов формирования постнеклассического этапа развития биологии. Как сторонники Дарвинизма, так и его противники, согласны с тем, что к настоящему времени биологическая эволюция человека, что бы она собой ни представляла, закончилась, сменившись эволюцией социальной[44]. То есть, процессы изменения человеческого фенотипа сменились процессами изменения человеческого сообщества, изменениями структуры человеческих взаимоотношений.

Смена эволюции фенотипа человека на эволюцию социальную является *общепризнанным* научным фактом.

Эволюционные представления Ч. Дарвина способствовали созданию и развитию современной теории изменчивости.

---

1. Что такое эволюция? Как развивались представления об эволюции в додарвиновский период?

2. В чем состоят основные принципы дарвиновского учения об эволюции?

3. Какие вы знаете современные гипотезы эволюции?

§ 3.2.2. Закономерности изменчивости

Изменчивость – это способность организма изменять свои внешние и внутренние признаки под влиянием внешней среды. Изменчивость, возникающая в отдельном организме и не передающаяся по наследству,

[44] Под социальной эволюцией подразумевается изменение отношений между людьми в обществе.

называется модификационной. Изменчивость, возникающая в генотипе и передающаяся следующим поколениям называется генотипической или наследственной.

Модификационная изменчивость определяется воздействием факторов окружающей среды на организм. Модификации носят приспособительных характер. Уникальная способность живых организмов приспосабливаться позволила выжить многим видам растений и животных при изменениях условий окружающей среды, произошедших из-за миграции, изменения климата, или техногенных воздействий.

Генотипическая (наследственная) изменчивость связана с изменениями в генотипе, что, неизбежно проявляется и в фенотипических признаках.

Генотипическая изменчивость обеспечивает возможность эволюции[45] живых существ и, в свою очередь, слагается из *комбинативной* и *мутационной* изменчивостей.

Комбинативная изменчивость является результатом случайного сочетания генов отца и матери при половом размножении и приводит к формированию нового уникального генотипа и фенотипа.

Мутационная изменчивость является результатом мутаций. *Мутации – это редкие, случайно возникшие, стойкие изменения генотипа, затрагивающие весь геном, либо отдельные хромосомы, их части или отдельные гены.* Они могут быть вредны, нейтральны и полезны для организма. Вещества или воздействия, приводящие к мутациям называются *мутагенами* (Химические реактивы, радиация, температурные колебания).

1. Что такое изменчивость? В каких случаях она возникает? Приведите приме ры различных типов изменчивости.

§ 3.2.3. Биоцентризм. Витацентризм. Социобиология. Постнеклассическая биология

Помимо эволюционной теории Ч. Дарвина в рамках неклассической биологии развивается ряд научных направлений, рассматривающих живые организмы, как специфические системы, свойства которых не могут быть сведены к свойствам, составляющих их физико-химических систем. Из множества этих направлений рассмотрим биоцентризм, витацентризм и социобиологию.

[45] Эволюция в биологии – это необратимое историческое развитие живой природы сопровождающееся образованием и вымиранием видов.

Биоцентризм применил принцип относительности, активно используемый неклассической физикой и признал относительность восприятия действительности различными организмами. Описание иерархии живых организмов, в которой человек занимает вершину пирамиды (центральное, главное место), было объявлено лишь одним из возможных восприятий (антропоцентризмом) – восприятием живого мира относительно человека – и предложено рассматривать и изучать каждый живой организм относительно самого рассматриваемого и изучаемого организма. Человек является лишь одним из представителей живых организмов, а не главным, как это постулирует антропоцентризм. При этом, субъективному восприятию действительности конкретным организмом дано специальное название – умвельт (нем. umwelt-окружающий мир, среда). Например, умвельт человека существенно отличается от умвельта лягушки, способной видеть только движущиеся предметы или от умвельта дельфина, воспринимающего не только звуки, но и ультразвуки, или даже от умвельта собаки, способной улавливать запахи, недоступные человеческому обонянию. Однако, следует иметь в виду, что разные человеческие индивиды также живут в различных умвельтах, видят разное в одних и тех же вещах. Например, человек, скопивший миллионное состояние после многих лет работы в банке, и позволивший себе поездку в Неаполь, вряд ли сможет оценить красоту итальянской архитектуры, поскольку эта красота просто не доступна для его умвельта. Таким образом, с точки зрения понятия «умвельт» биоцентризм означает признание множественности умвельтов, осознание того, что воспринимаемый нами мир не есть единственно возможный. Биоцентризм становится теоретической основой уважения к особенностям восприятия мира другими индивидами, нациями, расами, другими биологическими видами.

Витацентризм, по сути, представляет собой философское переосмысление таких явлений как жизнь и организмы, постулируя жизнь, как всемирную стихию, присущую любому проявлению действительности и воспринимая всю материю как скрытую форму жизни, а жизнь как форму скрытого разума.

Социобиология изучает группы и сообщества живых организмов (колонии флоры и насекомых, стаи животных и птиц) включая человеческое общество. Социобиологическая теория человека основывается на теории генно-культурной эволюции, то есть на тезисах о том, что развитие человечества опирается на контур обратной связи. Одни сообщества выживают, другие погибают, и происходит

естественный отбор на 3-х уровнях индивидуальный, половой, групповой. Социобиологи считают, что человеческое поведение также как и поведение животных может быть в какой-то части объяснено как результат естественного отбора. В современной социобиологии существуют направления стремящиеся рассматривать даже культуру в понятиях теории эволюции. Социобиологи стремятся найти рациональное объяснение поведения как результата давления естественного отбора в истории формирования и развития вида. Однако индивидуальные наследственные преимущества в качестве цели естественного отбора не всегда могут объяснить возникновение моделей социального поведения. Эволюция осуществляется также посредством группового отбора. Групповой отбор может объяснить возникновение в результате естественного отбора альтруистических моделей поведения. В социобиологии социальное поведение первоначально принимается как социобиологическая гипотеза на основе поиска определенной эволюционно стабильной стратегии соответствующей наблюдаемому поведению.

Постнеклассическая биология отказывается от дарвиновских представлений об эволюции, как результате естественного отбора в борьбе за выживание, возвращается к рассмотрению физико-химических основ функционирования растительного и животного мира, рассматривая жизнь как синергетический процесс и, соответственно, все живые организмы считает частным случаем синергетических самоорганизующихся систем. Аттрактором для живого организма, в том числе человека, является идеально здоровое тело взрослого индивида.

Заключение главы 3

Обобщая изложенный материал по биологии, можно выделить пять принципов, объединяющих все биологические дисциплины в единую науку о живой материи: клеточная теория, эволюция, генетика, гомеостаз и энергия.

● Клеточная теория – учение обо всём, что касается клеток. Все живые организмы состоят как минимум из одной клетки – основной структурно-функциональной единицы организмов. Базовые механизмы и химия всех клеток во всех земных организмах сходны; клетки происходят только от ранее существовавших клеток, которые размножаются путём клеточного деления. Клеточная теория описывает строение клеток, их деление, взаимодействие с внешней средой, состав внутренней среды и клеточной оболочки, механизм действия отдельных частей клетки и их взаимодействия между собой.

• Эволюция. Через естественный отбор и генетические изменения наследственные признаки популяции изменяются из поколения в поколение.

• Теория гена. Признаки живых организмов передаются из поколения в поколение вместе с генами, которые закодированы в ДНК. Информация о строении живых существ или генотип используется клетками для создания фенотипа, наблюдаемых физических или биохимических характеристик организма. Хотя проявляющийся фенотип, может подготовить организм к жизни в окружающей его среде, информация о среде не передаётся назад в гены.

• Гомеостаз. Физиологические процессы, позволяющие организму поддерживать постоянство своей внутренней среды независимо от изменений во внешней среде.

• Энергия. Атрибут любого живого организма, существенный для его состояния.

Вместе с тем, подводя итог, можно сказать, что загадки происхождения всего живого на земле, в том числе и человека, ещё только ждут искателя, который найдёт их окончательное решение. Вполне возможно, что таким искателем окажетесь именно Вы.

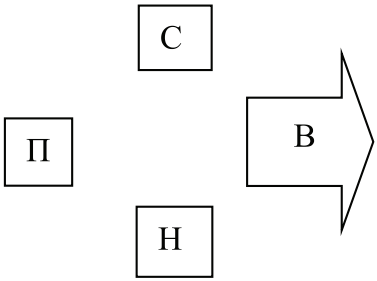
ПОСЛЕСЛОВИЕ

После изучения особенностей классического естествознания, краткого рассмотрения неклассического и постнеклассического естествознания следует определиться – что же является однозначным критерием, позволяющим разделять эти три этапа, три уровня данной науки?

В качестве такового критерия можно выбрать совокупность особенностей восприятия учёными различных эпох четырёх, условно выделенных компонентов действительности: пространства, времени, события и наблюдателя.

В классическом естествознании, сформированном И. Ньютоном, Р. Декартом, Р. Бойлем, пространство представляет собой протяжённость, в которой располагаются объекты и происходят наблюдаемые события, а время – длительность, относительно которой измеряются эти события, в том числе процессы эволюции. Причём длительность имеет однозначное направление от прошлого к будущему. Пространство (П), время (В), событие (С) и наблюдатель (Н) рассматриваются как четыре независимых друг от друга компонента действительности. Всякое событие жёстко детерминировано, то есть, воспринимается как неизбежное следствие причины, вызвавшей это событие.

Всякое событие жёстко детерминировано, то есть, воспринимается как неизбежное следствие причины, вызвавшей это событие.



КЛАССИЧЕСКОЕ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ

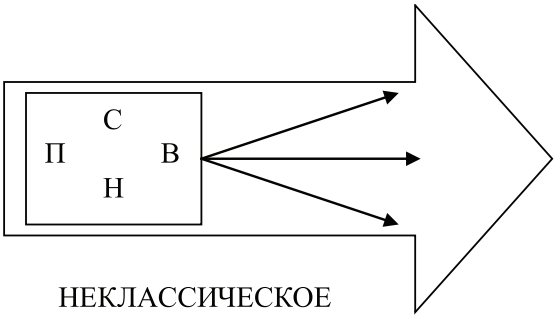
В неклассическом естествознании А. Эйнштейна, В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера восприятие пространства и времени оказывается результатом взаимодействия субъекта (наблюдателя) и объекта (пространства и времени). При этом все явления описываются относительно наблюдателя, для которого время представляет собой инвариантное расстояние (времениподобный интервал), являющееся функцией расстояния, преодолеваемого фотоном в вакууме. Принципиальное различие между пространством и временем исчезает, они оказываются аспектами единого четырёхмерного пространственно-временнóго континуума, восприятие свойств которого зависит от состояния наблюдателя (субъекта). В частности, для наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного движения относительно какого-либо предмета, многие свойства этого предмета (размеры, время, масса), оказываются функцией скорости движения наблюдателя. Для наблюдателя:

– воспринимающего массу, пространственно-временной континуум вокруг этой массы искривлён;

– воспринимающего точные координаты движущейся элементарной частицы, оказывается неопределяемым её импульс;

– воспринимающего точное значение импульса этой частицы, оказываются неопределяемыми её координаты и т. д.

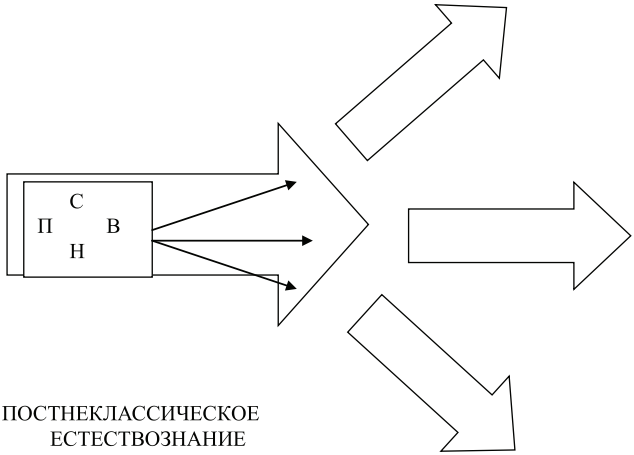
Кроме того, обнаруживается, что всякое наблюдение представляет собой взаимодействие наблюдающего (субъекта) с наблюдаемым (объектом), и, таким образом, субъект и объект представляют собой два аспекта неразрывного целого, формируется представление о субъект-объектном единстве. Все четыре условно выделенных компонента действительности (пространство, время, событие, наблюдатель)оказываются объединёнными в одно, единое целое, движущееся в уникурсальном направлении – от прошлого к будущему.



НЕКЛАССИЧЕСКОЕ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ

Хотя, на микроуровне открывается объективность статистического характера поведения элементарных частиц, т. е. отсутствие жёсткой детерминированности в законах их движения, а, значит, возможность течения микропроцесса в разных направлениях при абсолютно одинаковых начальных условиях, однако эта неопределённость, пока, не распространяется на макропроцессы. Реализация статистического поведения элементарных частиц формирует, в конечном итоге, макроявления, жёстко детерминированные причинно-следственными связями. Прошлое, настоящее и будущее макропроцессов рассматриваются неклассическим естествознанием как различные участки четырёхмерного континуума, вселенная – как замкнутая самодостаточная система. Неклассическое естествознание не противоречит классическому – все уравнения И. Ньютона оказываются частным случаем уравнений теории относительности А. Эйнштейна, явления макромира объясняются поведением элементарных частиц. То есть, неклассическое естествознание представляет собой *углубление* традиционных представлений о действительности. Впервые была предпринята попытка описать математическим языком не только технологическое устройство действительности, т. е. представить количественные соотношения между различными объективными явлениями, но и онтологическое её строение – математически сформулирована взаимосвязь воспринимаемых объектов с состоянием воспринимающего субъекта, называемого «наблюдатель».

Постнеклассическое естествознание, основоположниками которого считаются И. Пригожин и Г. Хакен, обнаружило ограниченность Эйнштейновского понимания пространства и времени – открыло способность материи к, так называемым, синергетическим макропроцессам, направление развития которых, начиная с определённого момента (точки бифуркации), становится многовариантным, а выбор конкретного варианта оказывается принципиально непредсказуемым для наблюдателя. Причём, возможным вариантом нередко оказывается самоорганизация системы (эволюция) в динамичный макрообъект, структурированный в пространстве и времени. Сам процесс такой эволюции также зачастую включает в себя несколько точек бифуркации. Таким образом, свойства прошлого и будущего в постнеклассическом естествознании становятся существенно различными. Если прошлое определяется изучением пройденного пути, то будущее оказывается объективно вероятностным и точно не предсказуемым в принципе, оно оказывается разветвлённым.



Эволюция и эволюционное время, с рассмотренных позиций, представляются движением от одной точки бифуркации к другой. Представления о пространстве-времени неклассической физики оказываются применимыми только в интервале между точками бифуркации, где царствуют детерминистические законы. Вблизи точки бифуркации четырёхмерный континуум проявляет новое свойство, не рассматриваемое теорией относительности А.Эйнштейна и являющееся прерогативой постнеклассического естествознания – свойство пространственно-временного *ветвления*, которым правит Его Величество Случай. Пространственно-временно́й континуум Вселенной оказывается для наблюдателя вещественно-энергетических процессов не только искривлённым, но также *разветвлённым,* а Вселенная воспринимается открытой для случайных воздействий. При этом под разветвлённостью пространственно-временно́го континуума подразумевается множественность решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих конкретные физико-химические процессы, т.е. множество вариантов эволюции события, из которых реализуется только один. Направление времени оказывается конкретным событием в точке бифуркации. Возникает необходимость говорить не только о пространственно-временно́й протяжённости, но о едином *пространственно-событийно-временно́м* континууме, в котором будущее разветвлено. Таким образом, постнеклассическое естествознание открыло объективность недетерминированности многих макропроцессов, в том числе и процессов эволюции.

Хотя представления постнеклассического естествознания не противоречат взглядам А. Эйнштейна, В. Гейзенберга, Э. Шрёдингера однако уравнения, описывающие синергетические процессы отнюдь не сводятся к формулам теории относительности или волновым уравнениям движения элементарных частиц и практически, пока, не сопоставимы. Таким образом, можно утверждать, что постнеклассический уровень естествознания не столько углубляет, сколько *расширяет* наши представления о картине мира по сравнению с уровнем неклассическим.

Достижение наукой неклассического уровня вовсе не означало, что развитие естествознания в рамках классических представлений прекратилось. Для проведения многих современнейших исследований вполне достаточно опираться на классические представления о пространстве, времени, событии и наблюдателе. Законы: Ньютона, Менделеева-Клапейрона, Бойля-Мариотта и др. никто никогда не отменит. Например, при сравнительно недавнем открытии и объяснении необычных свойств наноматериалов, состоящих из частиц размером 10^{-7}–10^{-9} м от исследователей не требовалось понимания теории относительности или вероятностной сути движения элементарных частиц. Точно также постнеклассические представления об устройстве мира отнюдь не сделали устаревшими достижения неклассического естествознания. Так, открытие единства электромагнитного и слабого взаимодействия, приведшее к формированию нового понятия «Электрослабое взаимодействие» лишь подтвердило общепринятое убеждение о неразрывной целостности всех аспектов бытия. Однако, работая в рамках представлений предыдущих этапов развития науки, современный исследователь помнит, что пользуется упрощёнными моделями бесконечно сложной в своём многообразии действительности.

И в заключение следует подчеркнуть, что каждый этап развития естествознания, являющийся новым, более высоким уровнем по отношению к этапу предыдущему, предлагал свои естественнонаучные картины мира. В частности:

– классическое естествознание описывало механическую и электродинамическую картины мира;

– неклассическое естествознание построило релятивистскую и квантово – полевую картины мира;

– постнеклассическое естествознание предложило эволюционно – синергетическую картину мира.

Каков будет следующий этап развития естествознания, сколь высок будет его уровень – решать Вам, грядущему поколению искателей Истины!

Приложение

Лабораторная работа
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Теоретическая часть

Скорость любой сложной (многостадийной) реакции равна скорости наиболее медленной стадии, которая называется *лимитирующей стадией реакции*.

Например, если превращение вещества A в вещество F осуществляется через последовательные стадии, протекающие со скоростями v_1, v_2, v_3, v_4, v_5

$$A \xrightarrow{v_1} B \xrightarrow{v_2} C \xrightarrow{v_3} D \xrightarrow{v_4} E \xrightarrow{v_5} F,$$

$$v_1 > v_2 > v_3 < v_4 < v_5$$

то скорость результирующей реакции

$$A \longrightarrow F$$

будет равна v_3.

Химическая реакция

$$2Na_2S_2O_3 + 2KI + 2HCl + H_2O_2 = Na_2S_4O_6 + 2KCl + 2NaI + 2H_2O$$

тиосульфат натрия — тетратионат натрия

протекает в две стадии:

I) $2KI + 2HCl + H_2O_2 = I_2 + 2KCl + 2H_2O$.

II) $2Na_2S_2O_3 + I_2 = Na_2S_4O_6 + 2NaI$.

Причём, лимитирующей является стадия I), скорость которой, в свою очередь, не зависит от изменения концентрации HCl, взятой в избытке. Таким образом, скорость v рассматриваемого процесса в указанных условиях определяется только величинами [KI] и $[H_2O_2]$, а также константой скорости химической реакции (k):

$$v = k \cdot [H_2O_2]^m \cdot [KI]^n, \qquad (1)$$

где m, n – порядки реакции по H_2O_2 и по KI соответственно, вычислив которые можно определить искомую величину k:

$$k = \frac{v}{[H_2O_2]^m \cdot [KI]^n}. \qquad (2)$$

Значение v уравнения (2) определяется по формуле:

$$v = \frac{[Na_2S_2O_3]}{2 \cdot t}, \tag{3}$$

где t – экспериментально определяемое время между началом реакции и полным расходом тиосульфата натрия, определяемым по окрашиванию раствора выделяющимся йодом (см. таблицу экспериментальной части).

Для вычисления порядков реакции m и n можно использовать два способа: аналитический и графический.

Аналитический способ вычисления порядка реакции по перекиси водорода

Экспериментально определяют скорости реакции для различных $[H_2O_2]$, но постоянной [KI]. При таких условиях уравнение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$v = k_1 \cdot [H_2O_2]^m, \tag{4}$$

где $k_1 = k \cdot [KI]^n$, или:

$$\lg v = m \cdot \lg [H_2O_2] + \lg k_1. \tag{5}$$

Для двух скоростей реакции v_1 и v_2, определённых для различных $[H_2O_2]_1$ и $[H_2O_2]_2$ соответственно, справедлива система двух уравнений с двумя неизвестными m и $\lg k_1$:

$$\left.\begin{aligned} \lg v_1 &= m \cdot \lg [H_2O_2]_1 + \lg k_1 \\ \lg v_2 &= m \cdot \lg [H_2O_2]_2 + \lg k_1 \end{aligned}\right\}, \tag{6}$$

решение которой позволит вычислить порядок реакции по перекиси водорода (m):

$$m_{21} = \frac{\lg(v_2/v_1)}{\lg([H_2O_2]_2/[H_2O_2]_1)}; \tag{7}$$

$$m_{32} = \frac{\lg(v_3/v_2)}{\lg([H_2O_2]_3/[H_2O_2]_2)}; \tag{8}$$

$$m_{31} = \frac{\lg(v_3/v_1)}{\lg([H_2O_2]_3/[H_2O_2]_1)}; \tag{9}$$

$$m = \frac{m_{21} + m_{32} + m_{31}}{3}. \tag{10}$$

Графический способ вычисления порядка реакции по перекиси водорода

Равенство (5) представляет собой уравнение прямой, построенной в координатных осях $\lg[H_2O_2]$ и $\lg v$, аналогичное уравнению прямой $y = ax + b$, построенной в координатных осях x и y. При этом m является тангенсом угла наклона этой прямой к оси $\lg[H_2O_2]$. Таким образом, построив график зависимости $\lg v$ от $\lg[H_2O_2]$, можно вычислить порядок реакции по $[H_2O_2]$, определяя тангенс угла наклона полученной прямой.

Аналитический способ вычисления порядка реакции по иодиду калия

Экспериментально определяют скорости реакции для различных [KI], но постоянной $[H_2O_2]$. При таких условиях уравнение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$v = k_2 \cdot [\mathrm{KI}]^n, \tag{11}$$

где $k_2 = k\,[H_2O_2]^m$, или:

$$\lg v = n \cdot \lg[\mathrm{KI}] + \lg k_2. \tag{12}$$

Для двух скоростей реакции v_1 и v_3, определённых для различных $[\mathrm{KI}]_1$ и $[\mathrm{KI}]_2$ соответственно, справедлива система двух уравнений с двумя неизвестными n и $\lg k_2$:

$$\left.\begin{aligned} \lg v_1 &= n \cdot \lg[\mathrm{KI}]_1 + \lg k_2 \\ \lg v_4 &= n \cdot \lg[\mathrm{KI}]_4 + \lg k_2 \end{aligned}\right\}, \tag{13}$$

решение которой позволит вычислить порядок реакции по иодиду калия (n):

$$n_{41} = \frac{\lg\left(v_4/v_1\right)}{\lg\left([\mathrm{KI}]_4/[\mathrm{KI}]_1\right)}; \tag{14}$$

$$n_{54} = \frac{\lg\left(v_5/v_4\right)}{\lg\left([\mathrm{KI}]_5/[\mathrm{KI}]_4\right)}; \tag{15}$$

$$n_{51} = \frac{\lg\left(v_5/v_1\right)}{\lg\left([\mathrm{KI}]_5/[\mathrm{KI}]_1\right)}; \tag{16}$$

$$n = \frac{n_{41} + n_{54} + n_{51}}{3}. \tag{17}$$

Графический способ вычисления порядка реакции по иодиду калия

Равенство (12) представляет собой уравнение прямой, построенной в координатных осях $\lg[\mathrm{KI}]$ и $\lg v$, аналогичное уравнению прямой $y = ax + b$, построенной в координатных осях x и y. При этом n является тангенсом угла наклона этой прямой к оси $\lg[\mathrm{KI}]$. Таким образом, построив график зависимости $\lg v$ от $\lg[\mathrm{KI}]$, можно вычислить порядок реакции по [KI], определяя тангенс угла наклона полученной прямой.

Экспериментальная часть

Занесите в тетрадь таблицу, приведённую ниже.

Номер опыта	Объём водного раствора (V, мл)	а) $m(Na_2S_2O_3)$, г б) $n(Na_2S_2O_3)$, моль в) $[Na_2S_2O_3]$, моль/л	а) $m(KI)$, г б) $n(KI)$, моль в) $[KI]$, моль/л г) $\lg[KI]$	а) $V_0(0{,}1\ M\ H_2O_2)$, мл б) $n(H_2O_2)$, моль в) $[H_2O_2]$, моль/л г) $\lg[H_2O_2]$	Время (t, с)	$v = \frac{[Na_2S_2O_3]}{2 \cdot t}$, (моль/л·с)	$\lg v$
1	$20(Na_2S_2O_3) + 20(KI) + 60(HCl) + 50(H_2O_2) =$	а) $2{,}50 \cdot 10^{-1}$ б) в)	а) $1{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)	а) $5{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)			
2	$20(Na_2S_2O_3) + 20(KI) + 60(HCl) + 150(H_2O) + 50(H_2O_2) =$	а) $2{,}50 \cdot 10^{-1}$ б) в)	а) $2{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)	а) $5{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)			
3	$20(Na_2S_2O_3) + 20(KI) + 60(HCl) + 450(H_2O) + 50(H_2O_2) =$	а) $2{,}50 \cdot 10^{-1}$ б) в)	а) $4{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)	а) $5{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)			
4	$20(Na_2S_2O_3) + 20(KI) + 60(HCl) + 100(H_2O) + 100(H_2O_2) =$	а) $2{,}50 \cdot 10^{-1}$ б) в)	а) $1{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)	а) $1{,}00 \cdot 10^{2}$ б) в) г)			
5	$20(Na_2S_2O_3) + 20(KI) + 60(HCl) + 300(H_2O) + 200(H_2O_2) =$	а) $2{,}50 \cdot 10^{-1}$ б) в)	а) $1{,}00 \cdot 10^{1}$ б) в) г)	а) $2{,}00 \cdot 10^{2}$ б) в) г)			

I. Используя компьютерную программу chemlab, проделайте 5 виртуальных опытов, описанных ниже, и проведите соответствующие расчёты.

Опыт 1

1.1. $V_п$ = 100 мл: 0,25 г $Na_2S_2O_3$ + 20 мл H_2O (до полного растворения);

1.2. $V_п$ = 100 мл: 10,00 г KI + 20 мл H_2O (до полного растворения);

1.3. $V_п$ = 600 мл: (1.1.) + 1.2;

1.4. $V_п$ = 600 мл: (1.3.) + 60 мл 1 М HCl;

1.5. $V_п$ = 600 мл: (1.4.) + 50 мл 0,1 М H_2O_2 (Измерьте время (t, с) между моментом добавления H_2O_2 и моментом начала окрашивания раствора. Результат занесите в таблицу.)

1.6. Рассчитайте следующие величины:

V, $n(Na_2S_2O_3)$, $[Na_2S_2O_3]$, n(KI), [KI], lg [KI], $n(H_2O_2)$, $[H_2O_2]$, $\lg[H_2O_2]$, v, $\lg v$

и занесите результаты в таблицу с точностью до второй цифры после запятой в нормализованной записи

$V_{мл}$ =

$$n\left(Na_2S_2O_3\right)_{моль} = \frac{m\left(Na_2S_2O_3\right)_г}{M\left(Na_2S_2O_3\right)_{г/моль}} =$$

$$\left[Na_2S_2O_3\right]_{моль/л} = \frac{n\left(Na_2S_2O_3\right)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

$$n(KI)_{моль} = \frac{m(KI)_г}{M(KI)_{г/моль}} =$$

$$[KI]_{моль/л} = \frac{n(KI)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

lg [KI] =

Поскольку при разбавлении растворов выполняется соотношение:

$$\frac{[C]}{[C]_0} = \frac{V_0}{V} \quad \text{или } [C] = [C]_0 \cdot \frac{V_0}{V},$$

то в данном случае:

$$\left[H_2O_2\right]_{моль/л} = 0{,}1 \text{ моль/л} \cdot \frac{50 \text{ мл}}{V_{мл}} =$$

$n(H_2O_2) = [H_2O_2]_0 \cdot V_0$ =

$\lg[H_2O_2] =$

$$v_{моль/л\cdot с} = \frac{[Na_2S_2O_3]_{моль/л}}{2 \cdot t} =$$

$\lg v =$

Опыт 2

2.1. $V_п$ = 100 мл: 0,25 г $Na_2S_2O_3$ + 20 мл H_2O (до полного растворения);

2.2. $V_п$ = 100 мл: 20,00 г KI + 20 мл H_2O (до полного растворения);

2.3. $V_п$ = 600 мл: (2.1.) + (2.2.);

2.4. $V_п$ = 600 мл: (2.3.) + 60 мл 1 М HCl + 150 мл H_2O;

2.5. $V_п$ = 600 мл: (2.4.) + 50 мл 0,1 М H_2O_2 (Измерьте время (t, с) между моментом добавления H_2O_2 и моментом начала окрашивания раствора. Результат занесите в таблицу.)

2.6. Рассчитайте следующие величины:

V, $n(Na_2S_2O_3)$, $[Na_2S_2O_3]$, n(KI), [KI], lg [KI], $n(H_2O_2)$, $[H_2O_2]$, $\lg[H_2O_2]$, v, $\lg v$

и занесите результаты в таблицу с точностью до второй цифры после запятой в нормализованной записи

$V_{мл} =$

$$n(Na_2S_2O_3)_{моль} = \frac{m(Na_2S_2O_3)_г}{M(Na_2S_2O_3)_{г/моль}} =$$

$$[Na_2S_2O_3]_{моль/л} = \frac{n(Na_2S_2O_3)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

$$n(KI)_{моль} = \frac{m(KI)_г}{M(KI)_{г/моль}} =$$

$$[KI]_{моль/л} = \frac{n(KI)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

lg [KI] =

Поскольку при разбавлении растворов выполняется соотношение:

$$\frac{[C]}{[C]_0} = \frac{V_0}{V} \quad \text{или } [C] = [C]_0 \cdot \frac{V_0}{V},$$

то в данном случае:

$$[H_2O_2]_{моль/л} = 0{,}1\ моль/л \cdot \frac{50\ мл}{V_{мл}} =$$

$n(H_2O_2)=[H_2O_2]_0 \cdot V_0 =$

$\lg[H_2O_2] =$

$$v_{моль/л\cdot с} = \frac{[Na_2S_2O_3]_{моль/л}}{2 \cdot t} =$$

$\lg v =$

Опыт 3

3.1. $V_п$ = 100 мл: 0,25 г $Na_2S_2O_3$ + 20 мл H_2O (до полного растворения);

3.2. $V_п$ = 100 мл: 40,00 г KI + 20 мл H_2O (до полного растворения);

3.3. $V_п$ = 600 мл: (3.1.) + (3.2.);

3.4. $V_п$ = 600 мл: (3.3.) + 60 мл 1 М HCl + 450 мл H_2O;

3.5. $V_п$ = 600 мл: (3.4.) + 50 мл 0,1 М H_2O_2 (Измерьте время (t, с) между моментом добавления H_2O_2 и моментом начала окрашивания раствора. Результат занесите в таблицу.)

3.6. Рассчитайте следующие величины:

V, $n(Na_2S_2O_3)$, $[Na_2S_2O_3]$, $n(KI)$, [KI], lg [KI], $n(H_2O_2)$, $[H_2O_2]$, $\lg[H_2O_2]$, v, $\lg v$

и занесите результаты в таблицу с точностью до второй цифры после запятой в нормализованной записи

$V_{мл} =$

$$n(Na_2S_2O_3)_{моль} = \frac{m(Na_2S_2O_3)_г}{M(Na_2S_2O_3)_{г/моль}} =$$

$$[Na_2S_2O_3]_{моль/л} = \frac{n(Na_2S_2O_3)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000\ мл/л =$$

$$n(KI)_{моль} = \frac{m(KI)_г}{M(KI)_{г/моль}} =$$

$$[KI]_{моль/л} = \frac{n(KI)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000\ мл/л =$$

lg [KI] =

Поскольку при разбавлении растворов выполняется соотношение:

$$\frac{[C]}{[C]_0} = \frac{V_0}{V} \quad \text{или } [C] = [C]_0 \cdot \frac{V_0}{V},$$

то в данном случае:

$$\left[H_2O_2\right]_{моль/л} = 0{,}1 \text{ моль/л} \cdot \frac{50 \text{ мл}}{V_{мл}} =$$

$n(H_2O_2) = [H_2O_2]_0 \cdot V_0 =$

$\lg[H_2O_2] =$

$$v_{моль/л \cdot с} = \frac{\left[Na_2S_2O_3\right]_{моль/л}}{2 \cdot t} =$$

$\lg v =$

Опыт 4

4.1. $V_п$ = 100 мл: 0,25 г $Na_2S_2O_3$ + 20 мл H_2O (до полного растворения);

4.2. $V_п$ = 100 мл: 10,00 г KI + 20 мл H_2O (до полного растворения);

4.3. $V_п$ = 600 мл: (4.1 + (4.2.);

4.4. $V_п$ = 600 мл: (4.3.) + 60 мл 1 М HCl + 100 мл H_2O;

4.5. $V_п$ = 600 мл: (4.4.) + 100 мл 0,1 М H_2O_2 (Измерьте время (t, с) между моментом добавления H_2O_2 и моментом начала окрашивания раствора. Результат занесите в таблицу.)

4.6. Рассчитайте следующие величины:

V, $n(Na_2S_2O_3)$, $[Na_2S_2O_3]$, n(KI), [KI], lg [KI], $n(H_2O_2)$, $[H_2O_2]$, $\lg[H_2O_2]$, v, $\lg v$

и занесите результаты в таблицу с точностью до второй цифры после запятой в нормализованной записи

$V_{мл} =$

$$n\left(Na_2S_2O_3\right)_{моль} = \frac{m\left(Na_2S_2O_3\right)_г}{M\left(Na_2S_2O_3\right)_{г/моль}} =$$

$$\left[Na_2S_2O_3\right]_{моль/л} = \frac{n\left(Na_2S_2O_3\right)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

$$n(KI)_{моль} = \frac{m(KI)_г}{M(KI)_{г/моль}} =$$

$$[\mathrm{KI}]_{\text{моль/л}} = \frac{n(\mathrm{KI})_{\text{моль}}}{V_{\text{мл}}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

lg [KI] =

Поскольку при разбавлении растворов выполняется соотношение:

$$\frac{[C]}{[C]_0} = \frac{V_0}{V} \quad \text{или } [C] = [C]_0 \cdot \frac{V_0}{V},$$

то в данном случае:

$$\left[\mathrm{H_2O_2}\right]_{\text{моль/л}} = 0{,}1 \text{ моль/л} \cdot \frac{100 \text{ мл}}{V_{\text{мл}}} =$$

$n(\mathrm{H_2O_2}) = [\mathrm{H_2O_2}]_0 \cdot V_0 =$

$\lg[\mathrm{H_2O_2}] =$

$$v_{\text{моль / л·с}} = \frac{\left[\mathrm{Na_2S_2O_3}\right]_{\text{моль/л}}}{2 \cdot t} =$$

$\lg v =$

Опыт 5

5.1. $V_{\text{п}}$ = 100 мл: 0,25 г $Na_2S_2O_3$ + 20 мл H_2O (до полного растворения);

5.2. $V_{\text{п}}$ = 100 мл: 10,00 г KI + 20 мл H_2O (до полного растворения);

5.3. $V_{\text{п}}$ = 600 мл: (5.1.) + (5.2.);

5.4. $V_{\text{п}}$ = 600 мл: (5.3.) + 60 мл 1 М HCl + 300 мл H_2O;

5.5. $V_{\text{п}}$ = 600 мл: (5.4.) + 200 мл 0,1 М H_2O_2 (Измерьте время (t, с) между моментом добавления H_2O_2 и моментом начала окрашивания раствора. Результат занесите в таблицу.)

5.6. Рассчитайте следующие величины:

V, $n(Na_2S_2O_3)$, $[Na_2S_2O_3]$, n(KI), [KI], lg [KI], $n(H_2O_2)$, $[H_2O_2]$, $\lg[H_2O_2]$, v, $\lg v$

и занесите результаты в таблицу с точностью до второй цифры после запятой в нормализованной записи

$V_{\text{мл}} =$

$$n\left(\mathrm{Na_2S_2O_3}\right)_{\text{моль}} \frac{m\left(\mathrm{Na_2S_2O_3}\right)_{\text{г}}}{M\left(\mathrm{Na_2S_2O_3}\right)_{\text{г/моль}}} =$$

$$\left[Na_2S_2O_3\right]_{моль/л} \frac{n\left(Na_2S_2O_3\right)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл/л} =$$

$$n(KI)_{моль} = \frac{m(KI)_г}{M(KI)_{г/моль}} =$$

$$[KI]_{моль/л} = \frac{n(KI)_{моль}}{V_{мл}} \cdot 1000 \text{ мл / л} =$$

$$\lg [KI] =$$

Поскольку при разбавлении растворов выполняется соотношение:

$$\frac{[C]}{[C]_0} = \frac{V_0}{V} \quad \text{или } [C] = [C]_0 \cdot \frac{V_0}{V},$$

то в данном случае:

$$\left[H_2O_2\right]_{моль/л} = 0{,}1 \text{ моль / л} \cdot \frac{200 \text{ мл}}{V_{мл}} =$$

$$n(H_2O_2) = [H_2O_2]_0 \cdot V_0 =$$

$$\lg[H_2O_2] =$$

$$v_{моль / л \cdot с} = \frac{\left[Na_2S_2O_3\right]_{моль/л}}{2 \cdot t} =$$

$$\lg v =$$

II. В заполненной таблице выберите из пяти опытов три опыта с одинаковой концентрацией KI. Пользуясь данными этих трёх опытов, составьте три системы уравнений, аналогичных системе уравнений (6) теоретической части. Вычислите аналитическим способом три значения порядка реакции по H_2O_2 (m). Определите среднее значение m.

III. По данным таблицы постройте график зависимости $\lg v$ от $\lg[H_2O_2]$ в координатных осях, представленных на рис. 1

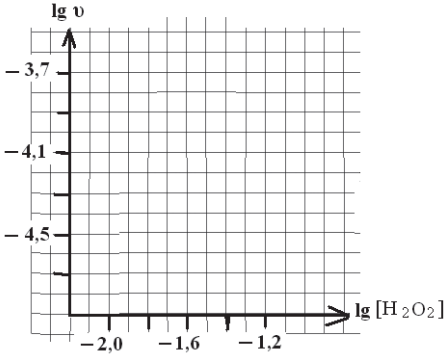


Рис. 1. Зависимость lgυ от lg[H_2O_2] при [KI] = const = позволяющая определить порядок реакции по H_2O_2: m = tg α =

Определите порядок реакции по H_2O_2 графическим способом.

IV. Сопоставьте среднее значение *m*, полученное аналитическим способом со значением *m*, полученным графическим способом.

V. В заполненной таблице выберите из пяти опытов три опыта с одинаковой концентрацией H_2O_2. Пользуясь данными этих трёх опытов, составьте три системы уравнений, аналогичных системе уравнений (6) теоретической части. Вычислите аналитическим способом три значения порядка реакции по KI (*n*). Определите среднее значение *n*.

VI. По данным таблицы постройте график зависимости lg*υ* от lg[KI] в координатных осях, представленных на рис. 2

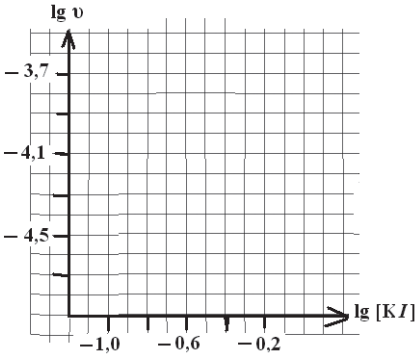


Рис. 2. Зависимость lgυ от lg[KI] при [H_2O_2] = const = позволяющая определить порядок реакции по KI: n = tg β =

Определите порядок реакции по H_2O_2 графическим способом.

VII. Сопоставьте среднее значение *n*, полученное аналитическим способом со значением *n*, полученным графическим способом.

VIII. Пользуясь формулой (2) теоретической части, рассчитайте константу скорости рассматриваемой химической реакции для каждого опыта (k_1; k_2; k_3; k_4; k_5) и определите среднее значение константы (k).

VIII. Ответьте на дополнительный вопрос: «Является ли рассмотренная реакция окислительно-восстановительной или нет?» и расставьте степени окисления при каждом атоме структурных формул веществ, приведённых ниже, дав этим веществам название.

IX. Выполните самостоятельную работу

I вариант	*II вариант*
Пользуясь результатами лабораторной работы, <u>рассчитать скорость химической реакции</u>	Пользуясь результатами лабораторной работы, <u>рассчитать скорость химической реакции</u>
$2Na_2S_2O_3 + 2KI + 2HCl + H_2O_2 =$ $= Na_2S_4O_6 + 2KCl + 2NaI + 2H_2O$,	$2Na_2S_2O_3 + 2KI + 2HCl + H_2O_2 =$ $= Na_2S_4O_6 + 2KCl + 2NaI + 2H_2O$,
протекающей в водном растворе с участием 16,6 г KI, 150 мл 0,2 М H_2O_2, при избытке HCl, и недостатке $Na_2S_2O_3$. При этом общий объём реакционной смеси составлял 500 мл. Ответ округлить до второй цифры после запятой в нормализованной записи.	протекающей в водном растворе с участием 8,3 г KI, 200 мл 0,15 М H_2O_2, при избытке HCl, и недостатке $Na_2S_2O_3$. При этом общий объём реакционной смеси составлял 500 мл. Ответ округлить до второй цифры после запятой в нормализованной записи.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....3

ВВЕДЕНИЕ.....4

Глава 1. ФИЗИКА.....9

1.1. Классическая физика.....9

§ 1.1.1. Основные понятия классической физики.....9

§ 1.1.2. Гравитационное поле.....15

§ 1.1.3. Электрическое поле.....20

§ 1.1.4. Магнитное поле.....25

§ 1.1.5. Вращение заряженной частицы в потоке магнитной индукции.....32

§ 1.1.6. Вихревое электрическое поле.....35

§ 1.1.7. Электромагнитные волны.....39

§ 1.1.8. Акустическое (звуковое) поле.....41

§ 1.1.9. Элементы термодинамики.....46

1.2. Неклассическая физика.....53

§ 1.2.1. Строение вещества.....58

§ 1.2.2. Фермионы.....58

§ 1.2.3. Спин.....60

§ 1.2.4. Бозоны.....61

§ 1.2.5. Инертные и гравитационные свойства массы.....65

§ 1.2.6. Фундаментальные взаимодействия.....66

§ 1.2.7. Элементы теории относительности.....68

§ 1.2.8. Специальная теория относительности.....69

§ 1.2.9. Общая теория относительности.....73

Заключение главы 1.....79

Глава 2. ХИМИЯ.....80

2.1. Классическая химия.....80

§ 2.1.1. Основные понятия классической химии (повторите определение химии, приведённое во введении).....80

§ 2.1.2. Эквивалент.....82

§ 2.1.3. Закон эквивалентов. Закон приведённого количества вещества.....87

§ 2.1.4. Скорость химических реакций.....93

§ 2.1.5. Теоретические основы органической химии.....100

§ 2.1.6. Алканы. Циклоалканы 101
§ 2.1.7. Алкены. Алкины. Алкадиены 109
§ 2.1.8. Ароматические углеводороды (арены) 116
§ 2.1.9. Кислородсодержащие органические соединения 122
§ 2.1.10. Азотсодержащие органические соединения 133
§ 2.1.11. Аминокислоты. Белки. Нуклеиновые кислоты 138
2.2. Неклассическая и постнеклассическая химия 145
§ 2.2.1. Реакция Белоусова-Жаботинского 146
§ 2.2.2. Модель «Орегонатор» 147
§ 2.2.3. Элементарные стадии реакции Белоусова-Жаботинского 150
§ 2.2.4. Общие черты синергетических систем 152
Заключение главы 2 155
Глава 3. БИОЛОГИЯ 156
3.1. Классическая биология 156
§ 3.1.1. Основные понятия классической биологии 156
§ 3.1.2. Уровни организации живого 159
§ 3.1.3. Понятие о цитологии 161
§ 3.1.4. Строение клетки 171
§ 3.1.5. Деление клетки 179
§ 3.1.6. Вирусы 180
§ 3.1.7. Размножение организмов 182
§ 3.1.8. Понятие о генетике 183
§ 3.1.9. Неполное доминирование 186
§ 3.1.10. Дигибридное скрещивание 188
§ 3.1.11. Взаимодействие генов 189
§ 3.1.12. Селекция. Биотехнология. Генная инженерия 192
3.2. Неклассическая и постнеклассическая биология 196
§ 3.2.1. Развитие представлений об эволюции 196
§ 3.2.2. Закономерности изменчивости 200
§ 3.2.3. Биоцентризм. Витацентризм. Социобиология. Постнеклассическая биология 201
Заключение главы 3 203
ПОСЛЕСЛОВИЕ 205
ПРИЛОЖЕНИЕ 210
Лабораторная работа.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ 210

Учебное издание

Шепель Олег Михайлович

ЕСТЕСТВОЗНАНИЕ ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОЙ НАУКИ

Учебное пособие

9 785913 275455

Технический редактор Кулакова Г.А.
Подписано в печать 17.08.2018
Бумага офсетная.
Гарнитура NewtonC
Формат 60×84 1/16
Печать трафаретная. Печ. л. 14,13.
Тираж 500 экз. Заказ № 027-18.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3