

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Е. Е. Полянская, О. И. Зайковский

КУРС ФИЗИКИ

Учебное пособие для студентов
института естествознания и экономики

2-е издание, исправленное и дополненное

Оренбург
Издательство ОГПУ
2016

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73
П54

Рецензенты

В. В. Гуньков, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель

Н. Ф. Искандеров, кандидат педагогических наук, доцент

Полянская Е. Е.

П54 **Курс физики** : учебное пособие для студентов института естествознания и экономики / Е. Е. Полянская, О. И. Зайковский ; Мин-во образования и науки РФ ; Оренбург. гос. пед. ун-т. — 2-е изд., испр. и доп. — Оренбург : Изд-во ОГПУ, 2016. — 148 с. : ил. ISBN 978-5-85859-643-1

Учебное пособие, основанное на материалах лекционного курса и адресованное студентам педагогических вузов, обучающимся по направлениям подготовки «Педагогическое образование» (естественнонаучные профили) и «Экология и природопользование», призвано облегчить усвоение курса физики с опорой на профессиональные интересы студентов. Физические принципы и законы иллюстрируются примерами из биологии, химии, географии, экологии. Вопросы и задания для самостоятельной работы, завершающие каждую главу, способствуют осмыслению и систематизации материала, развитию критического мышления, лежащего в основе общекультурных и профессиональных компетентностей студентов.

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ	6
§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики	6
§ 2. Законы динамики.....	8
§ 3. Принцип относительности.....	9
§ 4. Вращательное движение тел	10
§ 5. Законы сохранения в механике	14
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	19
Глава 2. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ	21
§ 6. Основные положения молекулярно-кинетической теории	21
§ 7. Основное уравнение кинетической теории идеального газа.....	21
§ 8. Температура	23
§ 9. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы в газах	24
§ 10. Реальный газ.....	26
§ 11. Агрегатные состояния и фазовые переходы	27
§ 12. Свойства жидкостей.....	30
§ 13. Смачивание. Капиллярные явления.....	31
§ 14. Осмос	34
§ 15. Кристаллические тела	36
§ 16. Механические свойства твердых тел.....	40
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	42
Глава 3. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	44
§ 17. Внутренняя энергия идеального газа. Первый закон термодинамики	44
§ 18. Работа при изменении объема газа. Адиабатические процессы	46
§ 19. Цикл Карно. Второе начало термодинамики	48
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	51
Глава 4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА	52
§ 20. Электрические заряды. Взаимодействие зарядов.....	52
§ 21. Электрическое поле. Напряженность электрического поля.....	53
§ 22. Работа сил электростатического поля. Потенциал.....	54
§ 23. Теорема Остроградского — Гаусса	56
§ 24. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	58
§ 25. Емкость. Энергия электрического поля	60
§ 26. Биопотенциалы	61
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	62
Глава 5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК	64
§ 27. Сила тока. Электродвижущая сила. Напряжение.....	64
§ 28. Закон Ома	65
§ 29. Последовательное и параллельное соединения проводников в электрической цепи	67
§ 30. Правила Кирхгофа.....	69
§ 31. Работа и мощность электрического тока.....	70
§ 32. Действие электрического тока на биологический организм	71
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	72
Глава 6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	73
§ 33. Индукция магнитного поля	73
§ 34. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера. Сила Лоренца	75
§ 35. Движение заряженных частиц в магнитном поле	76
§ 36. Магнитное поле в веществе.....	78
§ 37. Магнитный и механический моменты электрона. Спин. Магнитный момент атома	79
§ 38. Природа диа-, пара- и ферромагнетизма	81
§ 39. Магнитное поле и живой организм.....	82
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	82

Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ	83
§ 40. Электрический ток в металлах.....	83
§ 41. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов	85
§ 42. Электрический ток в газах	86
§ 43. Электрический ток в вакууме	90
§ 44. Электрический ток в полупроводниках	92
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	94
Глава 8. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	96
§ 45. Гармонические колебания и их характеристики.....	96
§ 46. Вынужденные колебания. Резонанс	98
§ 47. Сложение гармонических колебаний.....	99
§ 48. Волны в упругих средах	100
§ 49. Интерференция и дифракция волн	101
§ 50. Стоячие волны.....	102
§ 51. Звуковые волны.....	103
§ 52. Световые волны.....	105
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	108
Глава 9. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	109
§ 53. Законы геометрической оптики	109
§ 54. Линзы	112
§ 55. Глаз как оптическая система.....	114
§ 56. Приборы, увеличивающие угол зрения.....	115
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	118
Глава 10. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ	119
§ 57. Тепловое излучение	119
§ 58. Фотоэлектрический эффект.....	121
§ 59. Дисперсия света	123
§ 60. Поглощение света. Закон Бугера — Ламберта — Бера	123
§ 61. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм света	125
§ 62. Биологическое действие света	126
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	126
Глава 11. ФИЗИКА АТОМА	128
§ 63. Ядерная модель атома.....	128
§ 64. Квантовые постулаты Бора	129
§ 65. Элементарная теория атома водорода.....	130
§ 66. Трудности теории Бора. Основные идеи и представления квантовой механики.....	132
§ 67. Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.....	132
§ 68. Уравнение Шрёдингера	133
§ 69. Квантовые числа.....	136
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	137
Глава 12. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ	138
§ 70. Состав атомных ядер. Ядерные силы	138
§ 71. Энергия связи ядра.....	139
§ 72. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.....	140
§ 73. Ядерные реакции.....	141
§ 74. Свойства ионизирующих излучений.....	144
§ 75. Элементарные частицы.....	145
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	146
Рекомендуемая литература	147

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Курс физики» написан на основе материала лекций, читаемых студентам института естествознания и экономики Оренбургского государственного педагогического университета, и адресован студентам педагогических вузов, обучающимся по профилям подготовки «Химия», «Биология», «География», «Экология».

Согласно учебным планам указанных профилей, весьма компактный курс физики изучается в течение одного семестра. Трудность при этом обусловлена ограничениями, связанными с объемом материала, который может быть включен в односеместровый курс физики без перегрузок его содержания. Обзорный характер курса подчеркивает то обстоятельство, что он никоим образом не исчерпывает всю программу по физике, ограничиваясь выделением наиболее важных, по мнению авторов, тем. При отборе содержания учебного пособия мы стремились к тому, чтобы изучение книги позволяло создать у читателя достаточно цельное впечатление о достижениях и принципах физики.

Нами предпринята попытка обеспечить «привязку» общего курса физики к профессиональным интересам студентов путем органичного включения в соответствующие главы учебного пособия примеров из биологии, экологии, химии и географии, на которых демонстрируются возможности использования законов физики.

Авторы стремились по возможности освободить изучаемый материал от излишне усложненного математического аппарата с тем, чтобы акцентировать внимание на физической стороне дела.

Обращаем внимание читателя на вопросы и задания для самостоятельной работы, которые завершают каждую из глав учебного пособия. Они составлены авторами с целью способствовать как осмыслению и систематизации материала, так и развитию критического мышления, лежащего в основе общекультурных и профессиональных компетентностей студентов.

§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики

Механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Основной задачей механики является определение положения тел и их скоростей в любой момент времени.

Раздел механики, в котором движение тел рассматривается без выяснения причин этого движения, называется *кинематикой*.

Для определения положения тела в любой момент времени необходимо выбрать *систему отсчета*, в которой рассматривается движение этого тела. Под системой отсчета понимают *тело отсчета*, которое условно считают неподвижным, *систему координат*, связанную с телом отсчета, и *часы*, также связанные с телом отсчета. В кинематике система отсчета выбирается в соответствии с конкретными условиями задачи описания.

Линия, по которой движется некоторая точка тела, называется *траекторией* движения этой точки. Длина участка траектории, пройденного точкой при ее движении, — пройденным *путем*. Вектор, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется *перемещением*.

Движение тела, при котором отрезок, соединяющий две любые точки тела, переносится в процессе движения параллельно самому себе, называется *поступательным движением*. При поступательном движении тела все его точки перемещаются одинаково и для описания движения всего тела достаточно выяснить зависимость координат от времени для произвольно выбранной точки тела.

Тело, размерами которого в условиях поставленной задачи можно пренебречь, называют *материальной точкой*.

Возможность не учитывать размеры тела при механическом движении определяется не размерами самого тела, а конкретными условиями рассматриваемого движения. Одно и то же тело в одних условиях можно рассматривать как материальную точку, а в других такое упрощение недопустимо.

Например, космический корабль при описании его движения по орбите наблюдателем с поверхности Земли можно принять за материальную точку, так как размеры корабля здесь роли не играют. Однако космонавт, находящийся внутри космического корабля, не может его считать материальной точкой.

Способы описания движения тел. Существуют различные способы описания движения тел. При *координатном способе* задания положения тела в декартовой системе координат движение материальной точки определяется тремя функциями, выражающими зависимость координат от времени (рис. 1, а): $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$. Эта зависимость координат от времени называется *законом движения* (или уравнением движения).

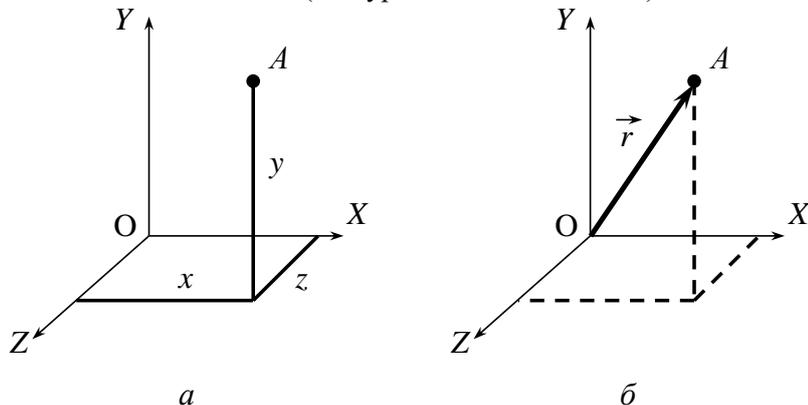


Рис. 1

При *векторном способе* положение точки в пространстве в любой момент времени определяется радиус-вектором $\vec{r} = \vec{r}(t)$, проведенным из начала координат до точки (рис. 1, б).

Скорость. При описании движения тела (материальной точки) нас интересует не только его положение в выбранной системе отсчета, но и закон движения, т.е. зависимость радиуса-вектора от времени. Пусть в момент времени t_1 радиус-вектор точки \vec{r}_1 , а в момент времени t_2 — радиус-вектор \vec{r}_2 . Тогда за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ точка совершит перемещение, равное $\Delta \vec{S} = \Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ (рис. 2).

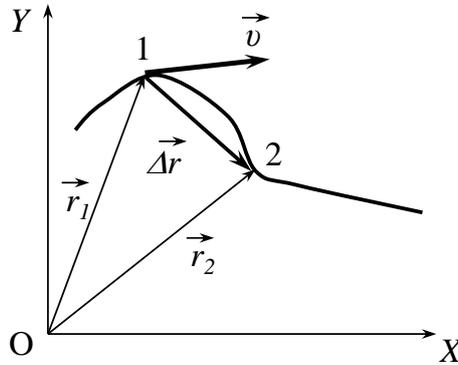


Рис. 2

Для характеристики движения тела вводится понятие мгновенной скорости, т.е. скорости в любой момент времени.

Мгновенной скоростью называют предел, к которому стремится отношение перемещения ко времени этого перемещения за бесконечно малый промежуток времени:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

В математике такой предел называется производной. Следовательно, мгновенная скорость есть производная радиус-вектора по времени:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}'(t).$$

Вектор мгновенной скорости \vec{v} направлен по касательной к траектории в сторону движения.

Ускорение. С течением времени скорость тела может изменяться как по модулю, так и по направлению. Для характеристики этого изменения вводится *мгновенное ускорение*:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v}'(t).$$

Направление вектора ускорения составляет некоторый угол с вектором скорости. Угол α между векторами скорости и ускорения может изменяться в пределах $0 \leq \alpha \leq \pi$. Углы $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ соответствуют прямолинейному движению. При $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$ модуль скорости возрастает, при $\frac{\pi}{2} < \alpha \leq \pi$ модуль скорости убывает. При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ модуль скорости не изменяется.

Вектор ускорения \vec{a} при криволинейном движении тела обычно представляют в виде суммы двух составляющих, направленных следующим образом: одна по касательной к траектории — это так называемое касательное (тангенциальное) ускорение \vec{a}_t , вторая — по нормали к касательной — нормальное ускорение \vec{a}_n (рис. 3). Модуль полного ускорения равен:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}.$$

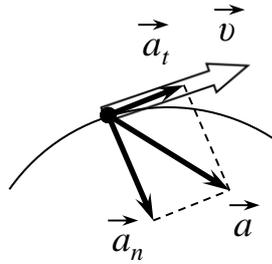


Рис. 3

Основная задача кинематики. Основная задача кинематики — это получение зависимостей от времени скорости и координат (или радиуса-вектора) материальной точки из известной зависимости от времени ее ускорения и известных начальных условий \vec{v}_0 и \vec{r}_0 .

Существует и обратная задача: по известному закону движения находятся скорость и ускорение материальной точки. Решение обеих задач в общем виде возможно с помощью дифференциального и интегрального исчисления.

Рассмотрим случаи, когда задача имеет простое решение (предполагаем, что движение тел происходит в плоскости XOY).

Равномерное прямолинейное движение материальной точки: $\vec{a} = 0$, $\vec{v} = \text{const}$. Начальные условия: x_0, y_0 . Из определения скорости получим:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t; \\ y = y_0 + v_y t \end{cases}$$

Равноускоренное прямолинейное движение материальной точки: $\vec{a} = \text{const}$. Начальные условия: x_0, y_0, v_{0x}, v_{0y} . Из определения ускорения получим:

$$\begin{cases} v_x = v_{0x} + a_x t; \\ v_y = v_{0y} + a_y t. \end{cases}$$

Рассчитав площадь под графиками $v_x(t)$ и $v_y(t)$, будем иметь:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t + \frac{a_x t^2}{2}; \\ y = y_0 + v_y t + \frac{a_y t^2}{2}. \end{cases}$$

§ 2. Законы динамики

При решении основной задачи кинематики системы отсчета выбирались совершенно произвольно, а причины ускорения не рассматривались. Чтобы решить основную задачу механики, необходимо выбрать рациональную систему отсчета и выяснить причины возникновения ускорений. Раздел механики, где решается эта проблема, называется *динамикой*.

Основные законы динамики были открыты великим ученым И. Ньютоном. Наблюдаемый характер движения любых тел можно объяснить при помощи трех законов, которые были сформулированы Ньютоном в 1686 г. в книге «Математические начала натуральной философии».

Механику (динамику), основанную на законах Ньютона, называют *ньютоновской*, или *классической*, механикой.

Первый закон Ньютона постулирует существование особого класса систем отсчета. В этих системах отсчета тело, не подверженное внешним воздействиям (такое тело называется *свободным*), находится в покое или движется равномерно и прямолинейно. Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются *инерциальными*. В инерциальных системах отсчета явления природы описываются наиболее простыми уравнениями.

Если существует хотя бы одна инерциальная система отсчета, в которой свободные тела покоятся или движутся равномерно и прямолинейно, то существует и бесконечное множество таких систем.

Второй закон Ньютона. Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

В международной системе единиц за единицу силы принимается сила, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с². Эта единица называется *ньютон (Н)*:

$$1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}.$$

Третий закон Ньютона. Тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой. Эти силы равны по модулю, противоположны по направлению. Однако они не могут уравновешивать друг друга, так как приложены к разным телам.

Важно отметить, что сила действия и сила противодействия имеют одинаковую природу.

Заметим, что не только первый, но и второй и третий законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета.

§ 3. Принцип относительности

Г. Галилей, исходя из наблюдений над природными явлениями, сформулировал фундаментальный физический принцип (впоследствии названный *классическим принципом относительности*), согласно которому *во всех инерциальных системах отсчета механические явления протекают одинаково при одинаковых начальных условиях.*

Именно поэтому, находясь в какой-либо инерциальной системе отсчета, нельзя с помощью механических опытов установить, движется эта система равномерно и прямолинейно или покоится.

Неинерциальные системы отсчета. В инерциальных системах отсчета ускорение тела согласно ньютоновской механике представляет собой результат его взаимодействия с другими телами, иначе говоря, результат действия сил.

Но существуют системы отсчета, в которых наблюдается ускоренное движение тел без воздействия на них каких-либо тел. Рассмотрим простой пример. В вагоне поезда на гладком столе стоит игрушечный автомобиль (рис. 4, а).

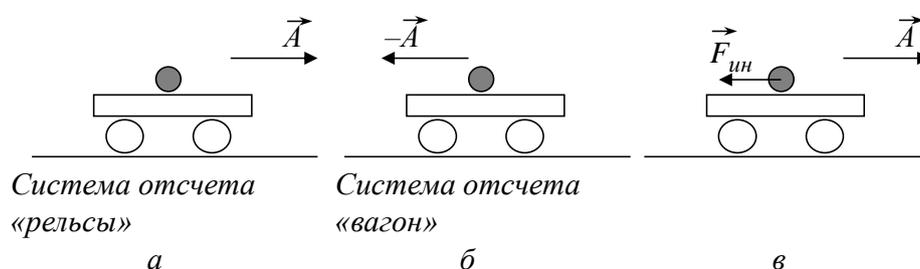


Рис. 4

При движении вагона вправо с ускорением \vec{A} игрушка своего положения относительно рельсов не изменит, если действием сил трения пренебречь. Относительно столика в вагоне игрушка будет катиться влево с ускорением $-\vec{A}$, равным по модулю ускорению самого вагона относительно рельсов, но направленным противоположно (рис. 4, б).

С точки зрения наблюдателя, находящегося в вагоне, второй и третий законы динамики нарушились. Ускорение игрушки возникло при отсутствии тел, действующих на эту модель.

Системы отсчета, в которых наблюдается ускоренное движение тел при отсутствии действия на них сил со стороны других тел, называются *неинерциальными системами отсчета*. Причиной неинерциальности систем отсчета является ускоренное движение этих систем отсчета относительно инерциальной системы.

Движение тел в неинерциальных системах отсчета можно описывать таким образом, как будто и в этих системах отсчета выполняется второй закон Ньютона, если формально считать, что здесь наряду с реальными силами взаимодействия существуют еще так называемые *силы инерции*.

Чтобы получить выражение для силы инерции, надо ускорение, с которым движется система отсчета, взятое с противоположным знаком, умножить на массу ускоряемого тела:

$$\vec{F} = -m\vec{A}.$$

Для рассмотренного выше примера можно сказать, что на модель автомобиля подействовала сила инерции $\vec{F}_{ин}$ (рис. 4, в):

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{A}.$$

Введение сил инерции дает формальную возможность не отказываться от второго закона Ньютона и в неинерциальных системах отсчета. Каждый раз, когда речь идет о действующих на тело силах, нужно, кроме различных сил, обусловленных взаимодействием тел, рассматривать также и силы инерции. Второй закон Ньютона будет выглядеть так:

$$\sum \vec{F} + \vec{F}_{ин} = m\vec{a},$$

где \vec{a} — ускорение тела относительно неинерциальной системы отсчета, $\sum \vec{F}$ — сумма реальных сил, действующих на тело.

Если тело движется относительно вращающейся системы отсчета, то, даже добавляя к силам, действующим со стороны других тел, центробежную силу инерции, мы не достигнем того, чтобы законы Ньютона соблюдались. Потребуется ввести еще некоторую добавочную силу инерции, зависящую от скорости тела (это сила Кориолиса). Сила Кориолиса не есть сила, вызываемая каким-либо реальным силовым полем, она возникает только вследствие описания явлений во вращающейся системе координат.

Не надо, впрочем, считать силу Кориолиса фиктивной, ее действия вполне реальны для нас. Земля — вращающаяся неинерциальная система отсчета, и большинство явлений, наблюдаемых нами, происходит в тонком слое на поверхности вращающейся сферы. При передвижении по поверхности сферы точка переходит с одного радиуса вращения на другой. Считая силу инерции реальной, возможно принять окружающий нас участок земной поверхности за неподвижную плоскость. На тела, движущиеся в северном полушарии с юга на север, действует сила Кориолиса, направленная на восток, т.е. вправо от направления движения. При направлении движения с севера на юг — на запад (снова вправо). Такая сила действует, например, на воду в реках, текущих в северном полушарии, подмывая в большей степени правый берег (он круче и обрывистее левого). По той же причине правые рельсы железных дорог снашиваются скорее левых. В южном полушарии, наоборот, более крутые левые берега и быстрее снашиваются левые рельсы.

Силой Кориолиса объясняется также то, что ветры на Земле образуют огромные вихри — циклоны и антициклоны. Ветры никогда не дуют прямо в направлении от большого давления к малому. Под действием силы Кориолиса воздух, стекающий к области пониженного давления, закручивается (в северном полушарии) против часовой стрелки (циклон), а воздух, растекающийся от мест повышенного давления, закручивается по часовой стрелке (антициклон). Циклоны и антициклоны имеют размеры до 3000 км в поперечнике и среднее время жизни около недели. Однако некоторые из них длительное время располагаются в одном и том же месте. Есть на Земле один постоянный циклон, и летом, и зимой стоящий около Исландии. Он рожден встречей теплых вод Гольфстрима с холодным полярным воздухом. Число циклонов и антициклонов по всей Земле в каждый момент времени примерно одинаково. Облачность закрывает около половины поверхности нашей планеты.

§ 4. Вращательное движение тел

Кинематика вращательного движения. *Вращательным движением* называется такое движение тела, при котором все его точки движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения, а плоскости окружностей перпендикулярны оси вращения. Вращается вокруг своей оси планета Земля, вследствие чего происходит смена дня и ночи, вращаются роторы турбин, шестерни и валы во всевозможных станках и машинах.

Сложные движения можно рассматривать как сочетание поступательного и вращательного движений. Движение колеса автомобиля, например, складывается из вращения колеса вокруг своей оси и поступательного движения оси относительно дороги.

При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси линейные скорости и ускорения для разных точек различны. Поэтому такое движение характеризуется *угловыми величинами*, одинаковыми в данный момент времени для всех точек вращающегося тела.

Мгновенная угловая скорость равна производной от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \varphi'(t); [\omega] = \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

Угловую скорость принято рассматривать как вектор, направленный вдоль оси вращения по правилу правого винта: если винт вращать в том же направлении, как вращается тело, то направление движения винта совпадает с направлением угловой скорости (рис. 5).

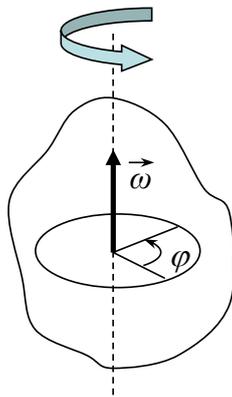


Рис. 5

Угловая и линейная скорости точки связаны соотношением:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}],$$

где r — радиус окружности, по которой вращается точка.

Если тело за любые равные промежутки времени поворачивается на одинаковые углы, то такое движение называют *равномерным вращательным движением*.

Используя понятие угловой скорости, можно дать еще одно определение равномерному вращательному движению. Равномерным вращательным движением называют движение с постоянной угловой скоростью ($\omega = \text{const}$). Примером вращательного движения, близкого к равномерному, может служить вращение Земли вокруг своей оси ($\omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$).

Равномерное вращательное движение встречается сравнительно редко. Гораздо чаще приходится иметь дело с вращательным движением, при котором угловая скорость с течением времени изменяется. Для описания неравномерного вращательного движения надо ввести величину, которая характеризовала бы изменение угловой скорости. Такой величиной является *мгновенное значение углового ускорения*, равное производной угловой скорости по времени:

$$\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{\omega}'(t); [\beta] = \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right].$$

При ускоренном вращении векторы $\vec{\beta}$ и $\vec{\omega}$ совпадают по направлению; при замедленном вращении вектор $\vec{\beta}$ направлен противоположно вектору $\vec{\omega}$.

Связь линейного ускорения точки с ее угловым ускорением:

$$\vec{a} = [\vec{\beta} \cdot \vec{r}],$$

где r — радиус окружности, по которой вращается точка.

Момент силы. Опыт показывает, что результат действия силы на тело, вращающееся вокруг оси, зависит не только от значения силы, но и от того, где эта сила приложена к телу.

Пусть к телу, вращающемуся вокруг оси, в некоторой точке А приложена сила \vec{F} , лежащая в плоскости, перпендикулярной оси (рис. 6). Разложим эту силу на две составляющие \vec{F}_r и \vec{F}_t — вдоль радиуса вектора \vec{r} и перпендикулярно ему. Составляющая \vec{F}_r не может изменить характер движения тела; составляющая \vec{F}_t сообщает телу угловое ускорение.

Моментом силы \vec{F} будем называть вектор \vec{M} , направленный вдоль оси вращения и ориентированный по правилу правого винта относительно вектора силы. Модуль момента силы равен

$$M = Fr \sin \alpha = Fd,$$

где $d = r \sin \alpha$ — плечо силы. Оно равно кратчайшему расстоянию между осью вращения и направлением действия силы.

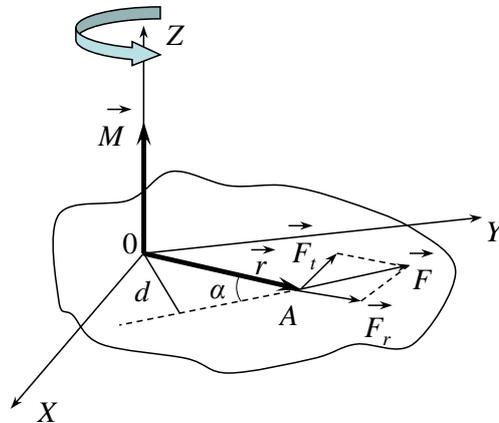


Рис. 6

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Чтобы получить искомое уравнение, рассмотрим вначале простейший случай, когда материальная точка массой m вращается на невесомом твердом стержне длиной r вокруг оси (рис. 7).

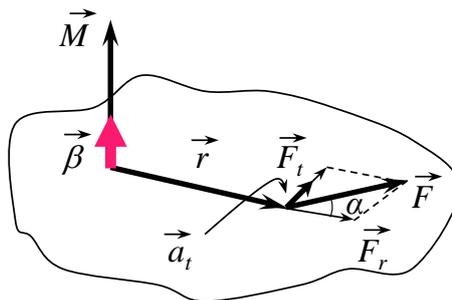


Рис. 7

Второй закон Ньютона для этой точки запишется так:

$$ma_t = F_t = F \sin \alpha.$$

Но тангенциальное ускорение

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d(r\omega)}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = r\beta.$$

Подставив в предыдущую формулу, получим:

$$mr\beta = F \sin \alpha.$$

Умножив обе части этого равенства на r , чтобы свести действие силы к ее моменту, будем иметь:

$$mr^2\beta = Fr \sin \alpha = M.$$

Произведение массы точки на квадрат ее расстояния до оси назовем *моментом инерции* материальной точки относительно оси:

$$I = mr^2; [I] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2].$$

Тогда

$$I\beta = M.$$

Поскольку векторы $\vec{\beta}$ и \vec{M} направлены в одну и ту же сторону — вдоль оси вращения, то данное выражение можно записать в векторном виде:

$$I\vec{\beta} = \vec{M}.$$

Это и есть основное уравнение динамики вращательного движения. Оно у нас получено для одной точки, но легко обобщается на вращающееся твердое тело. В самом деле, твердое тело можно рассматривать как совокупность частиц с массами $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, расположенных на расстояниях $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ от оси вращения. Так как все эти точки вращаются с одинаковым угловым ускорением, то, суммируя систему уравнений $mr^2\beta = Fr\sin\alpha = M$, написанных для всех частиц, получим:

$$(m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + m_3r_3^2 + \dots + m_nr_n^2)\vec{\beta} = \sum \vec{M}_i + \sum \vec{M}_e,$$

где $\sum \vec{M}_i$ — сумма моментов внутренних сил, $\sum \vec{M}_e$ — сумма моментов внешних сил. Но сумма моментов внутренних сил равна нулю, и остается только сумма моментов внешних сил.

Моментом инерции тела назовем сумму моментов инерции составляющих его частиц:

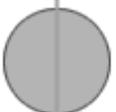
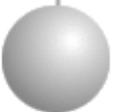
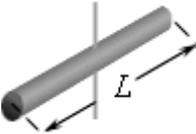
$$I = \sum m_i r_i^2.$$

Обозначив сумму моментов внешних сил $\sum \vec{M}_e$ через \vec{M} , увидим, что уравнение $I\vec{\beta} = \vec{M}$ применимо и к любому вращающемуся твердому телу.

Основное уравнение динамики вращающегося твердого тела аналогично второму закону Ньютона. В самом деле, ускорение материальной точки пропорционально сумме сил и обратно пропорционально ее массе; угловое ускорение вращающегося твердого тела пропорционально сумме моментов сил и обратно пропорционально моменту инерции тела.

Однако имеется и принципиальная разница. Если масса тела является инвариантом и не зависит от того, как тело движется, то момент инерции тела зависит от того, вокруг какой оси оно вращается. При изменении положения оси вращения или ее направления в пространстве значение момента инерции меняется. В таблице 1 приведены формулы для вычисления моментов инерции некоторых тел относительно оси, проходящей через центр масс этих тел.

Таблица 1

Тело	Ось вращения проходит	Момент инерции
Обруч	 через центр обруча перпендикулярно плоскости обруча	mR^2
Диск (цилиндр)	 через центр диска перпендикулярно плоскости диска	$0,5 mR^2$
Диск	 через центр диска вдоль его диаметра	$0,25 mR^2$
Шар	 через центр шара	$0,4 mR^2$
Стержень длиной L	 через середину тонкого стержня перпендикулярно ему	$1/12 mL^2$

§ 5. Законы сохранения в механике

Основную задачу механики — определение положения тела в любой момент времени — можно решить с помощью законов Ньютона, если заданы начальные условия и силы, действующие на тело, как функции координат и скоростей (и времени). На практике эти зависимости не всегда известны. Однако многие задачи в механике можно решить, не зная значений сил, действующих на тело. Это возможно потому, что существуют величины, характеризующие механическое движение тел, которые сохраняются при определенных условиях. Если известны положение тела и его скорость в какой-то момент времени, то при помощи сохраняющихся величин можно определить положение и скорость этого тела после любого взаимодействия, не прибегая к законам динамики.

Сохраняющимися величинами в механических процессах являются импульс, момент импульса и энергия.

Закон сохранения импульса. Умножим выражение для второго закона Ньютона в виде $\vec{F} = m\vec{a}$ (при действии постоянной силы) на Δt :

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{a}\Delta t = m\Delta\vec{v} = m(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \Delta(m\vec{v}).$$

Величину $\vec{p} = m\vec{v}$ называют *импульсом тела* (иначе — количеством движения), $\vec{F}\Delta t$ — *импульсом силы*. Используя эти понятия, второй закон Ньютона можно сформулировать следующим образом: *импульс приложенных к телу сил равен изменению импульса тела*:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}.$$

В этой более общей формулировке не предполагается постоянство ни силы, ни массы. Именно в таком общем виде мы дальше будем понимать второй закон Ньютона — основное уравнение динамики.

При рассмотрении системы тел следует учесть, что каждое из них может взаимодействовать как с телами, принадлежащими системе, так и с телами, не входящими в эту систему. Пусть имеется система из двух материальных точек, взаимодействующих друг с другом внутренними силами \vec{F}_{12} и \vec{F}_{21} . Внешние силы, с которыми внешние тела действуют на эти точки, обозначим \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 8).

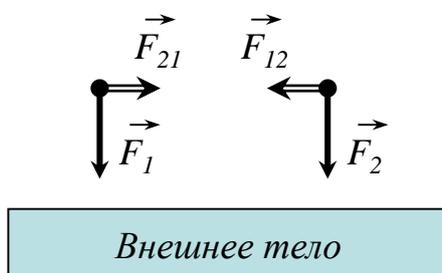


Рис. 8

Запишем второй закон Ньютона для каждой из материальных точек рассматриваемой системы для промежутка времени Δt :

$$(\vec{F}_1 + \vec{F}_{21})\Delta t = \Delta\vec{p}_1;$$

$$(\vec{F}_2 + \vec{F}_{12})\Delta t = \Delta\vec{p}_2.$$

Сложив оба равенства, получим:

$$\Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)\Delta t + (\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21})\Delta t.$$

По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0$, следовательно, изменение импульса всей системы, равное векторной сумме изменений импульсов составляющих ее частиц, выглядит так:

$$\Delta\vec{p} = \Delta\vec{p}_1 + \Delta\vec{p}_2 = (\vec{F}_1 + \vec{F}_2)\Delta t.$$

Эту формулу можно обобщить для системы, состоящей из любого числа тел:

$$\Delta\vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i \Delta t = \vec{F} \Delta t,$$

где $\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$ — векторная сумма внешних сил, действующих на рассматриваемую систему тел.

В инерциальных системах отсчета изменение полного импульса системы материальных точек равно импульсу внешних сил, действующих на эту систему.

Система тел, на которые не действуют внешние силы или сумма всех внешних сил равна нулю, называется *замкнутой*. Тогда из приведенного выше выражения следует *закон сохранения импульса*: в замкнутой системе тел импульс системы сохраняется. Этот вывод является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Действительно, если $\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0$, то $\Delta \vec{p} = 0$, $\vec{p} = const$.

К незамкнутым системам тел закон сохранения импульса не применим; однако постоянными остаются проекции импульса на координатные оси, в направлении которых сумма проекций приложенных внешних сил равна нулю.

В неинерциальных системах отсчета при отсутствии взаимодействия тел скорость движения тел изменяется со временем. Поэтому импульс любого тела при отсутствии взаимодействия с другими телами не остается постоянным, если выбрана неинерциальная система отсчета. Следовательно, необходимым условием применимости закона сохранения импульса к замкнутой системе взаимодействующих тел является выбор инерциальной системы отсчета.

В неинерциальных системах отсчета закон сохранения импульса несправедлив.

Закон сохранения момента импульса. Основное уравнение динамики вращательного движения тела под действием постоянного момента силы $\vec{M} = const$ можно представить в виде:

$$\vec{M} = I\vec{\beta} = I \frac{\vec{\omega}_2 - \vec{\omega}_1}{\Delta t},$$

откуда

$$\vec{M}\Delta t = I\vec{\omega}_2 - I\vec{\omega}_1.$$

Пользуясь законами Ньютона, можно доказать, что полученное уравнение справедливо и тогда, когда момент инерции тела изменяется. В этом случае уравнение динамики вращающегося тела в более общем виде запишется так:

$$\vec{M}\Delta t = \Delta(I\vec{\omega}).$$

Произведение момента инерции тела на угловую скорость его вращения называется *моментом импульса*:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}.$$

Вектор момента импульса направлен в ту же сторону, что и вектор угловой скорости (если ось вращения проходит через ось симметрии тела).

Момент импульса — одна из важнейших характеристик вращательного движения тела. Когда суммарный момент сил, действующих на тело, относительно данной оси вращения равен нулю, то

$$\Delta \vec{L} = \Delta(I\vec{\omega}) = 0.$$

Отсюда

$$\vec{L} = I\vec{\omega} = const.$$

Это и есть *закон сохранения момента импульса*. Закон сохранения момента импульса справедлив не только для одного тела, но и для любой замкнутой системы тел.

Замечательной особенностью вращательного движения является свойство вращающихся тел при отсутствии взаимодействий с другими телами сохранять неизменными не только момент импульса, но и направление оси вращения в пространстве. Неизменным ориентиром для путешественников на поверхности Земли служит Полярная звезда. Примерно на эту звезду направлена ось вращения Земли, и кажущаяся неподвижность Полярной звезды на протяжении столетий наглядно доказывает, что в течение этого времени направление оси вращения Земли в пространстве не изменилось. Но если точно измерять момент импульса в течение длительного времени, то окажется, он все же поворачивается. За 26 тысяч лет момент опишет коническую поверхность вокруг полюса эклиптики и вернется почти к начальному положению.

нию (прецессия земной оси). Прецессия возникает в результате неравномерного гравитационного притяжения к Луне экваториального уширения земной фигуры.

Все известные нам планеты, все их спутники вращаются. Существует некая закономерность во вращении планет: чем больше масса планеты, тем быстрее она вращается (хотя из этого правила есть исключения). Разгадка этой закономерности скрыта в истории образования Солнечной системы. По современным представлениям Солнце и планеты образовались из вращающейся туманности, состоящей из газа и твердых пылевых частиц. При столкновениях частицы укрупнялись, образуя зародыши планет и Солнца. Наибольшее число столкновений происходило в центре масс системы, туда же собрался и почти весь газ туманности. Так образовалось Солнце. Однако почти весь начальный момент импульса туманности оказался сосредоточенным не в Солнце, а в планетах. После того как Солнце зажглось, под воздействием его излучения легкие газы из ближайшей окрестности Солнца были рассеяны на периферию. Там из них образовались планеты-гиганты. Планеты же земной группы оказались составленными в основном из вещества твердых частиц. При сжатии вещества вращающейся туманности в плотные шары планет скорость вращения возрастает — это следствие закона сохранения момента импульса. Поэтому неудивительно, что у планет-гигантов и скорость вращения оказалась больше, чем у меньших по размерам планет.

Закон сохранения энергии в механических процессах. Если на тело действует постоянная сила \vec{F} , составляющая постоянный угол α с перемещением тела \vec{S} , то *работа* этой силы определяется как произведение модулей силы и перемещения на косинус угла между векторами силы и перемещения, т.е. как скалярное произведение вектора силы на вектор перемещения:

$$A = FS \cos \alpha = \vec{F}\vec{S}.$$

Единица работы в СИ — *джоуль (Дж)* — равна работе, совершаемой силой в 1 Н на перемещении 1 м вдоль направления действия силы.

Если на тело действует переменная сила, то, чтобы вычислить ее работу, нужно перемещение разбить на малые участки $\Delta\vec{S}_i$ и найти сначала элементарную работу: $\Delta A_i = \vec{F}_i \Delta\vec{S}_i$, а затем полную работу как предел суммы элементарных работ:

$$A = \int_{M_1}^{M_2} F dS \cos \alpha,$$

где M_1 и M_2 — начальная и конечная точки перемещения.

Графически работа определяется по площади криволинейной трапеции, как показано на рисунке 9.

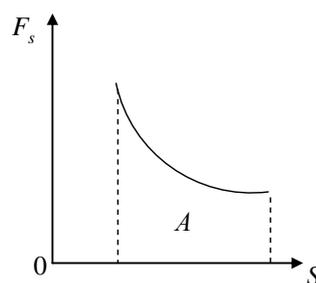


Рис. 9

На оси абсцисс откладываются в определенном масштабе модули перемещения, на оси ординат проекция силы $F_s = F \cos \alpha$ (также в соответствующем масштабе). Тогда площадь трапеции численно равна работе силы.

Выразим работу силы через начальную и конечную скорости тела, движущегося под действием этой силы. Для этого рассмотрим простейший случай действия постоянной силы вдоль перемещения. Подставив в формулу $A = FS \cos \alpha = \vec{F}\vec{S}$ выражения для силы $F = ma$ и перемещения $S = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$, получим:

$$A = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \cos 0^\circ = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Величину $mv^2/2$ для материальной точки называют *кинетической энергией* E_k .

Полученный результат называют *теоремой о кинетической энергии*. Теорема о кинетической энергии верна для сил любой природы, в том числе и для переменных. Если на тело действует несколько сил, то под A следует понимать работу векторной суммы всех сил.

Теорема о кинетической энергии справедлива для любой инерциальной системы отсчета. Вместе с тем следует учесть, что кинетическая энергия и работа силы являются относительными величинами, зависящими от выбора системы отсчета.

Кинетической энергией обладают не только тела, движущиеся поступательно, но и любые вращающиеся тела. Формула для кинетической энергии вращающегося тела записывается в виде:

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

В практике часто встречаются случаи, когда тело одновременно вращается и в то же время перемещается в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Такое движение называется *плоским*. Например, качение цилиндра или шара по плоскости является примером плоского движения. Полная кинетическая энергия твердого тела в этом случае равна сумме кинетической энергии поступательного движения и кинетической энергии вращения вокруг оси, проходящей через центр масс:

$$E_k = \frac{mv_0^2}{2} + \frac{I_0\omega^2}{2},$$

где I_0 — момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс, v_0 — скорость движения центра масс тела, направленная перпендикулярно оси вращения.

Выше мы показали, что работа силы определяется разностью конечного и начального значений кинетической энергии. При этом кинетическая энергия зависит только от состояния движения тела — его скорости и не зависит от того, с помощью какого процесса тело пришло в состояние движения с этой скоростью.

Но кроме кинетической энергии есть еще один вид энергии — *потенциальная*. Потенциальной энергией взаимодействующих тел называется энергия, зависящая от взаимного расположения этих тел.

Нетрудно показать, что работа сил тяжести, тяготения, упругости не зависит от формы траектории, а определяется только положениями начальной и конечной точек. Такие силы называют *консервативными*.

$$A_{12\text{тяжести}} = mgh_1 - mgh_2;$$

$$A_{12\text{тяготения}} = -\frac{GmM}{r_1} + \frac{GmM}{r_2};$$

$$A_{12\text{упругости}} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Введем понятие потенциальной энергии как некоторой функции состояния взаимодействующих тел (их взаимного расположения) и будем считать, что работа консервативной силы равна убыли потенциальной энергии:

$$A_{12} = -\Delta E_p = -(E_{p_2} - E_{p_1}) = E_{p_1} - E_{p_2}.$$

Тогда оказывается, что потенциальная энергия тела в поле силы тяжести равна

$$E_{p\text{тяжести}} = mgh + const.$$

Потенциальная энергия в поле тяготения равна

$$E_{p\text{тяготения}} = -\frac{GmM}{r} + const.$$

А потенциальная энергия деформированной пружины равна

$$E_{p\text{упругости}} = \frac{kx^2}{2} + const.$$

Заметим, что потенциальная энергия является функцией координат точек, в которых расположены взаимодействующие тела. Значение произвольной постоянной в формулах зависит от выбора нулевого уровня потенциальной энергии. Изменение потенциальной энергии от выбора нулевого уровня не зависит.

Если в замкнутой системе действуют только консервативные силы, то работа, совершаемая этими силами, равна взятому с противоположным знаком изменению потенциальной энергии тел:

$$A_{12} = -\Delta E_p.$$

С другой стороны, работа этих же сил равна изменению кинетической энергии системы тел:

$$A_{12} = \Delta E_k.$$

Из сравнения этих формул получаем выражение

$$E_{p_1} + E_{k_1} = E_{p_2} + E_{k_2},$$

которое представляет собой закон сохранения полной механической энергии:

$$E = E_p + E_k = const.$$

Полная механическая энергия сохраняется только в таких замкнутых системах, в которых действуют лишь консервативные силы.

В общем случае, когда в системе действуют силы, зависящие от скорости, например силы трения (такие силы называются диссипативными), и силы, зависящие от времени (их называют нестационарными), полная механическая энергия не сохраняется.

Энергетика бега. Предположим, что предмет передвигается с постоянной скоростью по горизонтальной поверхности. Работа, которая при этом совершается, сводится к преодолению трения и сопротивления воздуха. При беге действие трения невелико, но, тем не менее, бег с постоянной скоростью связан со значительными затратами энергии. Энергия тратится на движения бегуна вверх-вниз и на отталкивание ногами от почвы. Кроме того, тело бегуна превращает энергию в теплоту. Дополнительная причина потери энергии заключается в том, что ноги бегуна, масса которых составляет приблизительно 50% от массы тела, в процессе бега постоянно ускоряются и тормозятся. Поэтому работа, выполняемая мышцами ног для поддержания движения тела вперед с постоянной скоростью, велика.

Работа, выполняемая ногами бегуна, равна

$$A = Fd = \frac{mv^2}{2},$$

где F — сила мышц, d — расстояние, на котором при каждом шаге мышцы выполняют работу, а m — масса ног. Известно, что сила мышц пропорциональна квадрату характеристической длины L (высоты человека). Дело в том, что все мышцы состоят из пучков мышечных волокон. Эти волокна почти одинаковы и упакованы с равной плотностью в мышцах различных организмов. Сила мышц в некотором приближении прямо пропорциональна числу волокон в мышце, приходящихся на единицу площади поперечного сечения.

Площадь мышц организма, опять же в некотором приближении, прямо пропорциональна характерному поперечному сечению, которое равно квадрату характеристической длины.

Кроме того, расстояние d пропорционально L , а масса пропорциональна L^3 .

Следовательно,

$$v^2 = \frac{2Fd}{m} \approx \frac{L^2 L}{L^3} = const.$$

Таким образом, скорость, которую может поддерживать бегун, не зависит от его размеров. В действительности этот анализ относится не только к человеку. Все животные с аналогичными формами будут иметь сравнимые скорости бега независимо от размеров.

Люди — плохие бегуны, поскольку их движение обеспечивается мышцами, целиком сосредоточенными в ногах, — слишком велика масса, которая должна быть ускорена и заторможена. Самые быстроходные животные имеют тонкие ноги, а основная мышечная масса сосредоточена у них в теле.

Если бы скорости бега были приблизительно независимы от размеров животных, природный баланс между охотником и добычей нарушился бы. Заметим, что волк и заяц имеют почти одинаковые скорости бега, что верно и в случае гепарда и газели.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Предложите основания для классификации механического движения тел. Классифицируйте механическое движение тел по названным Вами основаниям.

2. Из чего состоит система отсчета? Из каких соображений выбирают рациональную систему отсчета? Заполните пустые ячейки таблицы.

Пример механического движения тела	Тело отсчета
При движении автомобиля на спидометре отображается скорость 90 км/ч	
	Летающий самолет
Земля движется по своей орбите со скоростью 30 км/с	
	Планета Марс

3. Приведите примеры задач, в которых автобус можно рассматривать как материальную точку; нельзя рассматривать как материальную точку.

4. При каком движении путь равен модулю перемещения? Может ли путь при движении тела уменьшаться?

5. Дайте определение мгновенной скорости. Заполните таблицу.

Характер изменения мгновенной скорости тела	Пример механического движения тела
Мгновенная скорость изменяется только по модулю	
Мгновенная скорость изменяется только по направлению	
Мгновенная скорость изменяется и по модулю, и по направлению	
Мгновенная скорость не изменяется ни по модулю, ни по направлению	

6. Что называют мгновенным ускорением? Заполните таблицу.

Угол между векторами скорости и ускорения	Характер механического движения тела
$\alpha = 0$	
$\alpha = \pi$	
$\alpha = \pi/2$	
$0 \leq \alpha < \pi/2$	
$\pi/2 < \alpha \leq \pi$	

7. Аристотель утверждал, что тело движется только при условии, что его что-то (или кто-то) движет. Каким наблюдениям противоречит это утверждение? Сформулируйте первый закон Ньютона.

8. Используя интернет-ресурсы, опишите различия между геоцентрической и гелиоцентрической системами мира.

9. Как формулируется второй закон Ньютона? Всегда ли направление движения тела совпадает с направлением действующей на тело силы? Приведите примеры, подтверждающие ваш ответ.

10. Сформулируйте третий закон Ньютона. Какие из действующих на Вас сейчас сил компенсируют друг друга? На какие тела действуете Вы? Укажите, какие из рассмотренных сил связаны третьим законом Ньютона?

11. Вспомните, в чем суть закона всемирного тяготения (используйте интернет-ресурсы). Спрогнозируйте, как изменился бы окружающий нас мир, если бы вдруг исчезла гравитация? За-

полните первый столбец таблицы. Просмотрите видеоролик «Что будет, если гравитация исчезнет?» (<http://www.youtube.com/watch?v=E2XwCHNgW9Q>). Заполните второй столбец таблицы.

Я думаю, что исчезновение гравитации может привести к:	Последствия исчезновения гравитации, представленные в фильме:

12. Что такое силы инерции? Чем они отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета? Как направлена сила Кориолиса? Приведите примеры ее проявления.

13. Основные величины и уравнения кинематики и динамики вращательного движения легко запоминаются, если сопоставить их с величинами и уравнениями поступательного движения. Проведите сопоставление в ходе заполнения таблицы формулами.

Поступательное движение		Вращательное движение	
Кинематика			
Путь		Угол поворота	
Мгновенная скорость		Мгновенная угловая скорость	
Мгновенное ускорение		Мгновенное угловое ускорение	
Связь линейных величин с угловыми:			
Динамика			
Масса		Момент инерции	
Основное уравнение динамики поступательного движения		Основное уравнение динамики вращательного движения	
Импульс		Момент импульса	
Закон сохранения импульса		Закон сохранения момента импульса	
Кинетическая энергия		Кинетическая энергия вращающегося тела	

14. Чему равен импульс тела? Зависит ли импульс тела от выбора системы отсчета? Сформулируйте закон сохранения импульса. В каких случаях можно использовать закон сохранения импульса для незамкнутых систем?

15. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса? В каких системах он выполняется? Приведите примеры.

16. Что такое механическая работа? Приведите примеры движения, когда работа силы тяжести положительна/отрицательна/равна нулю.

17. Используя интернет-ресурсы, подберите наиболее удачный, на Ваш взгляд, опорный конспект по теме «Закон сохранения энергии в механических процессах». Какие изменения и дополнения Вы хотели бы в него внести?

18. Выясните, как связаны законы сохранения в механике с симметрией пространства и времени.

§ 6. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Основу МКТ составляют три положения, которые доказаны экспериментально.

1. Вещество состоит из частиц. Мельчайшая частица вещества — молекула. Наглядным доказательством положения являются изображения атомов и молекул вещества с помощью ионного и электронного микроскопов.

2. Частицы вещества непрерывно и хаотически движутся. Например, в газе молекулы двигаются свободно по любым направлениям, будучи ограничены только столкновениями со стенками сосуда и друг с другом. Пробег молекул между ударами очень мал ($\sim 10^{-7}$ м). Доказательством данного положения является ряд явлений природы. Прежде всего, это *диффузия* — процесс перемешивания веществ, которые приведены в тесный контакт (особо отчетливо проявляется в газах), и *броуновское движение* — движение твердых частиц, взвешенных в газе или жидкости. Объясняется хаотическими соударениями частицы с молекулами газа (жидкости) (чем мельче частицы и выше температура, тем интенсивнее движение).

3. Частицы взаимодействуют друг с другом. Об этом свидетельствует существование жидких и твердых тел. В недеформированном теле частицы вещества находятся в состоянии устойчивого равновесия, т.е. сила взаимодействия между ними равна нулю, а энергия взаимодействия минимальна. Если попытаться тело сжать, т.е. сблизить молекулы (атомы), то между ними возникает сила отталкивания, а если растянуть — то сила притяжения. Доказано, что межмолекулярные силы имеют электрическое происхождение — они возникают за счет взаимодействия электронных оболочек атомов. График, выражающий зависимость энергии межмолекулярного (межатомного) взаимодействия от расстояния между молекулами, имеет вид, изображенный на рисунке 10.

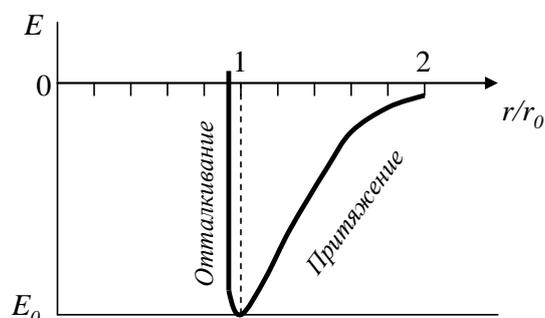


Рис. 10

Как видно, при $r = r_0$ энергия минимальна ($E_0 < 0$); на других расстояниях она по модулю возрастает, и при $r \geq 2r_0$ энергия межмолекулярного взаимодействия практически равна нулю, что характерно для газообразного состояния вещества.

§ 7. Основное уравнение кинетической теории идеального газа

В 1857 г. немецкий физик Р. Клаузиус, используя модель идеального газа, впервые систематически изложил кинетическую теорию газов. Он ввел понятие о средних величинах, длине свободного пробега молекул, вычислил давление газа на стенки сосуда и среднюю длину пути между двумя столкновениями молекул.

Идеальным Клаузиус назвал газ, удовлетворяющий следующим условиям:

- 1) объемом всех молекул газа можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда, в котором этот газ находится;
- 2) время столкновения молекул друг с другом пренебрежимо мало по сравнению со временем между двумя столкновениями (т.е. временем свободного пробега молекулы);
- 3) молекулы взаимодействуют между собой только при непосредственном соприкосновении, при этом они отталкиваются;
- 4) силы притяжения между молекулами идеального газа ничтожно малы, и ими можно пренебречь.

Исходя из этих положений, Клаузиус вывел все свойства идеального газа и установил соотношения между его микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопическими параметрами газа называют индивидуальные характеристики молекул (масса молекулы, ее скорость, импульс, кинетическая энергия поступательного движения). Параметры газа как физического тела называются *макроскопическими* (температура, объем, давление газа). Одной из важнейших задач молекулярно-кинетической теории было установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами газа.

Выведем основное уравнение для случая, когда газ находится в сосуде кубической формы. Это делается только ради упрощения расчета. Вообще же основное уравнение МКТ можно вывести для газа, находящегося в сосуде любой формы и даже при отсутствии всякого сосуда.

Пусть в кубическом сосуде с ребром a находится идеальный газ, состоящий из N молекул; масса каждой молекулы m . Ввиду полной хаотичности движения молекул результат их действия на стенки сосуда будет таким же, как в случае, если бы $1/3$ всех молекул двигалась прямолинейно между передней и задней стенками сосуда, $1/3$ — между правой и левой и $1/3$ — между верхней и нижней. Поэтому допустим, что число молекул, движущихся в каждом из трех взаимно перпендикулярных (и перпендикулярных к соответствующим стенкам) направлений, равно $N^* = 1/3 N$.

Проследим мысленно за одной из молекул, летящей со скоростью v в направлении правой стенки сосуда. Долетев до стенки, молекула ударит в нее, отскочит назад, полетит к левой стенке, ударит в нее и т.д. Обозначим силу удара молекулы о стенку через Δf , а продолжительность времени удара — через Δt . Тогда импульс силы, сообщенный молекулой стенке при ударе, равен $\Delta f \Delta t$.

Согласно закону изменения импульса, импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\Delta f \Delta t = mv - (-mv) = 2mv.$$

Знак минус показывает, что скорость при ударе изменяет направление на противоположное.

Молекула действует на правую стенку с силой Δf кратковременно, только в моменты ударов; остальную и притом большую часть времени между ударами она не действует на эту стенку. Поэтому средняя сила Δf_{cp} действия молекулы на правую стенку за одну секунду значительно меньше фактической силы Δf .

Очевидно, что импульс средней силы равен сумме импульсов всех сил Δf , действующих на стенку в течение одной секунды:

$$\Delta f_{cp} \cdot 1 = \Delta f \Delta t k,$$

где k — число ударов молекулы в правую стенку за одну секунду. Число k равно перемещению молекулы за 1 с, деленному на перемещение $2a$, совершаемое ею между двумя последовательными ударами в правую стенку. Так как перемещение молекулы за одну секунду численно равно скорости v , то $k = v/2a$. Тогда средняя сила

$$\Delta f_{cp} = \Delta f \Delta t \frac{v}{2a} = 2mv \frac{v}{2a} = \frac{mv^2}{a}.$$

Учитывая, что на правую стенку сосуда действуют и все другие (N^*) молекулы газа, найдем полную силу f , с которой газ действует на правую стенку:

$$f = \sum_1^{N^*} \Delta f_{cpi} = \sum_1^{N^*} \frac{mv_i^2}{a} = \frac{m}{a} \sum_1^{N^*} v_i^2,$$

где $v_i = v_1, v_2, \dots, v_{N^*}$ — скорости молекул.

Разделим и умножим правую часть равенства на N^* :

$$f = \frac{mN^*}{a} \cdot \frac{1}{N^*} \sum_1^{N^*} v_i^2.$$

Нетрудно установить, что выражение $\frac{1}{N^*} \sum_1^{N^*} v_i^2$ представляет собой квадрат *средней квадратичной скорости молекул* (квадратный корень из суммы квадратов отдельных значений величины, деленной на их число), которую мы обозначим через u . Тогда

$$f = \frac{mN^* u^2}{a}.$$

Разделим обе части последнего равенства на a^2 и заменим N^* на $1/3 N$:

$$\frac{f}{a^2} = \frac{1}{3} \frac{mNu^2}{a^3}.$$

Но $a^2 = S$ — площадь правой стенки сосуда, а $a^3 = V$ — объем сосуда. Тогда

$$\frac{f}{S} = \frac{1}{3} \frac{mNu^2}{V}.$$

Очевидно, что $f/S = p$ — давление газа на правую стенку, а $N/V = n_0$ — число молекул в единице объема газа. Поэтому

$$p = \frac{1}{3} mn_0 u^2.$$

Разделив и умножив правую часть этого равенства на 2, получим

$$p = \frac{2}{3} n_0 \frac{mu^2}{2},$$

где $mu^2/2 = W_{cp}$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы. Следовательно,

$$p = \frac{2}{3} n_0 W_{cp}.$$

Очевидно, что совершенно такое же выражение получится и для давления газа на каждую из остальных стенок сосуда. Это и есть *основное уравнение кинетической теории идеального газа (уравнение Клаузиуса)*. Основное уравнение показывает, что *давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа*.

§ 8. Температура

Основное уравнение МКТ для идеального газа устанавливает связь легко измеряемого макроскопического параметра — давления — с такими микроскопическими параметрами газа, как средняя кинетическая энергия и концентрация молекул. Но, измерив только давление газа, мы не можем узнать ни среднее значение кинетической энергии молекул в отдельности, ни их концентрацию. Следовательно, для нахождения микроскопических параметров газа нужны измерения еще какой-то физической величины, связанной со средней кинетической энергией молекул. Такой величиной в физике является *температура*.

Через некоторое время после установления контакта между телами изменения макроскопических параметров тел прекращаются. Такое состояние тел называется *тепловым равновесием*. Физический параметр, одинаковый во всех частях системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, называется *температурой* тела. В повседневной практике наиболее распространен способ измерения температуры с помощью жидкостного термометра. Существенным недостатком данного способа является то, что шкала температуры при этом оказывается связанной с конкретными физическими свойствами определенного вещества, используемого в качестве рабочего тела в термометре (ртути, глицерина, спирта...).

Для того чтобы найти более совершенный способ определения температуры, нужно найти такую величину, которая была бы одинаковой для любых тел, находящихся в положении теплового равновесия.

Экспериментальные исследования свойств газов показали, что для любых газов, находящихся в состоянии теплового равновесия, отношение произведения давления газа на его объем к числу молекул оказывается одинаковым:

$$\frac{pV}{N} = \text{const} = \theta.$$

Этот опытный факт позволяет принять величину θ в качестве естественной меры температуры. С учетом основного уравнения МКТ

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} W_{cp} = \theta.$$

Следовательно, средняя кинетическая энергия молекул любых газов, находящихся в тепловом равновесии, одинакова. Величина θ выражается в джоулях. Температуру же принято измерять в *градусах*. Принимая, что температура T в градусах и величина θ связаны уравнением

$$\theta = kT,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единицы температуры, получаем

$$\frac{pV}{N} = kT \text{ или } p = n_0 kT.$$

Последнее уравнение показывает, что имеется возможность выбрать температурную шкалу, не зависящую от природы газа, используемого в качестве рабочего тела (*абсолютная шкала*). Ее предложил английский физик У. Кельвин, поэтому шкалу называют также *шкалой Кельвина*. Единица температуры по абсолютной шкале, называемая *кельвином (К)*, выбрана равной одному градусу по шкале Цельсия. Температура 0°C по шкале Цельсия соответствует температуре 273 К по абсолютной шкале. Абсолютная температура T может быть только положительной или равной нулю. Температура, при которой давление идеального газа при постоянном объеме должно быть равно нулю, называется *абсолютным нулем температуры*.

Коэффициент $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К называется *постоянной Больцмана*, в честь Л. Больцмана, одного из создателей МКТ.

Сопоставляя уравнения $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} W_{cp} = \theta$ и $\frac{pV}{N} = kT$, получаем

$$W_{cp} = \frac{3}{2} kT.$$

Следовательно, средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

§ 9. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы в газах

Используя зависимость давления идеального газа от его температуры и концентрации молекул

$$p = n_0 kT,$$

можно найти связь между макроскопическими параметрами газа — объемом V , его давлением p и температурой T . Учитывая, что концентрация молекул газа равна $n = N/V$, а число молекул N определяется произведением количества вещества ν на постоянную Авогадро N_a , получаем

$$p = \frac{\nu N_a}{V} kT.$$

Произведение постоянной Авогадро N_a на постоянную Больцмана k называется *молярной газовой постоянной R* ($R \approx 8,31$ Дж/(моль К)). Тогда

$$pV = R\nu T.$$

Количество вещества ν можно найти, зная массу вещества m и его молярную массу M :

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

Таким образом, уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M}RT.$$

Уравнение Менделеева — Клапейрона показывает, что возможно одновременное изменение пяти параметров, характеризующих состояние идеального газа. Однако многие процессы в газах, происходящие в природе и осуществляемые в технике, можно рассматривать приближенно как процессы, в которых изменяются лишь два параметра из пяти. Особую роль в физике и технике играют три процесса — изотермический, изохорный, изобарный. Рассмотрим эти процессы.

Изотермический процесс — процесс, протекающий при постоянной температуре T . Из уравнения состояния идеального газа следует, что при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы произведение давления газа на его объем должно оставаться постоянным:

$$pV = const.$$

Данное уравнение было получено из эксперимента до создания молекулярно-кинетической теории газов в 1662 г. английским физиком Р. Бойлем и в 1676 г. французским физиком Э. Мариоттом. Поэтому это уравнение называют *законом Бойля — Мариотта*.

Изотермический процесс можно осуществить, например, путем изменения объема газа при постоянной температуре. График изотермического процесса называется *изотермой*. Изотерма, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его объем, является гиперболой (рис. 11, а).

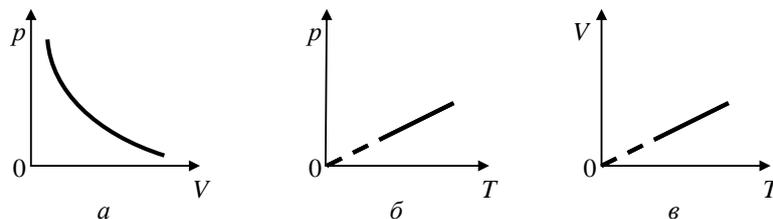


Рис. 11

Изохорный процесс — процесс, протекающий при неизменном объеме и условии $m = const$ и $M = const$.

При этих условиях из уравнения состояния идеального газа для двух значений температуры T_0 и T следует

$$p = p_0 \frac{T}{T_0}.$$

Если T_0 выбрать равным 273 К (0°C), то, обозначив

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{273\text{ К}} = \alpha,$$

получим уравнение для изохорного процесса

$$p = p_0 \alpha T,$$

где p — давление газа при абсолютной температуре T , p_0 — давление газа при температуре 0°C , α — температурный коэффициент давления газа.

График уравнения изохорного процесса называется *изохорой*. Изохора, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается давление газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, проходящей через начало координат (рис. 11, б).

Экспериментальным путем зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Ж. Шарль в 1787 г. Поэтому уравнение изохорного процесса называется *законом Шарля*.

Изохорный процесс можно осуществить, например, нагреванием воздуха при постоянном объеме.

Изобарный процесс — процесс, протекающий при неизменном давлении и условии $m = const$ и $M = const$.

Таким же способом, как это было сделано для изохорного процесса, можно получить для изобарного процесса уравнение

$$V = V_0 \alpha T,$$

где V — объем газа при абсолютной температуре T , V_0 — объем газа при температуре 0°C , α — температурный коэффициент объемного расширения газа.

График уравнения изобарного процесса называется изобарой. Изобара, изображенная в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой отсчитывается объем газа, а по оси абсцисс — его абсолютная температура, является прямой, проходящей через начало координат (рис. 11, в).

Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 г. французский физик Ж. Гей-Люссак. Поэтому уравнение изобарного процесса называют *законом Гей-Люссака*. Изобарный процесс происходит, например, при нагревании или охлаждении воздуха в стеклянной колбе, соединенной со стеклянной трубкой, отверстие в которой закрыто небольшим столбом жидкости.

§ 10. Реальный газ

Экспериментальные исследования свойств газов при высоких давлениях и низких температурах убедительно показали, что уравнение состояния идеального газа дает хорошее согласие с экспериментом для каждого исследуемого газа лишь при температуре выше некоторого значения, вполне определенного для каждого вещества, и при не очень высоких давлениях. Расхождение результатов теории и практики в области низких температур и высоких давлений газов свидетельствует о непригодности при этих условиях упрощенной модели строения газов, в которой не учитываются размеры молекул и силы взаимного притяжения.

В 1873 г. голландский физик И. Ван-дер-Ваальс показал, что согласие результатов теории и эксперимента в области высоких давлений и низких температур оказывается значительно лучшим, если учесть, что молекулы не только отталкиваются при соударениях, но еще и притягиваются друг к другу сравнительно слабыми силами на расстояниях, сравнимых с размерами молекул.

При движении молекулы вдали от стенок сосуда, в котором заключен газ, на нее действуют силы притяжения соседних с ней молекул, но равнодействующая всех этих сил в среднем равна нулю, так как молекулу со всех сторон окружает в среднем одинаковое число соседей. При приближении некоторой молекулы к стенке сосуда все остальные молекулы газа располагаются по одну сторону от нее, и равнодействующая всех сил притяжения оказывается направленной от стенки сосуда внутрь газа. Это приводит к тому, что уменьшается импульс, передаваемый молекулой стенке сосуда. В результате давление газа на стенки сосуда уменьшается по сравнению с тем, каким оно было бы в отсутствие сил притяжения между молекулами:

$$p = p_{ид} - \Delta p.$$

Уменьшение импульса, переданного молекулой при ударе о стенку, пропорционально силе притяжения, действующей на нее со стороны ее ближайших соседей, т.е. пропорционально концентрации молекул. Полный же импульс, передаваемый всеми молекулами газа стенкам сосуда, в свою очередь пропорционален их концентрации. Поэтому вместо уравнения для идеального газа $p_{ид} = n_0 k T$ для реального газа получим:

$$p + \Delta p = n_0 k T.$$

Поскольку сила, действующая на одну молекулу, пропорциональна концентрации окружающих ее молекул, а суммарное давление также пропорционально концентрации, то дополнительное давление пропорционально квадрату концентрации, или, что то же самое, обратно пропорционально квадрату объема газа:

$$\Delta p = \frac{a}{V^2},$$

где a — постоянная, зависящая от вида газа. Учитывая это, для одного моля газа получим:

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V}.$$

Это первая поправка, вводимая в уравнение Ван-дер-Ваальса.

Вторая поправка должна учесть тот факт, что при любых, даже сколь угодно больших давлениях объем газа не может стать равным нулю. В модели Ван-дер-Ваальса молекулы принимают за твердые шарики диаметром d . В этом случае оказывается, что молекулы реального газа свободно перемещаются не в объеме сосуда V , а в уменьшенном объеме

$$V^* = V - b.$$

Здесь b — так называемый «запрещенный объем»; он равен

$$b = \frac{4}{3}\pi d^3 \frac{N}{2} = \frac{2\pi}{3}Nd^3,$$

где N — общее число молекул газа.

Итак, получаем

$$p + \frac{a}{V^2} = \frac{RT}{V - b},$$

или иначе:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Это и есть *уравнение Ван-дер-Ваальса* для одного моля реального газа. Заметим, что если у идеального газа объем обратно пропорционален давлению и его изотерма в осях p , V — это гипербола, то у ван-дер-ваальсовского газа эта зависимость гораздо более сложна. График изотермы — кубическая парабола:

$$pV^3 - V^2(pb + RT) + aV - ab = 0.$$

Хотя уравнение Ван-дер-Ваальса дает лучшее согласие теории с результатами эксперимента, все же точность расчетов, выполненных на его основе, обычно недостаточна для решения практических задач на уровне требований современной техники. Поэтому на практике приходится использовать уравнения состояния реального газа еще более сложного вида. Уравнение же Ван-дер-Ваальса интересно тем, что дает качественное объяснение основных отличий в поведении реального газа от идеального.

§ 11. Агрегатные состояния и фазовые переходы

Всякое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Эти состояния называются также *фазами вещества*. Точнее говоря, понятие «фаза» шире, чем понятие «агрегатное состояние». В пределах одного агрегатного состояния вещество может находиться в нескольких фазах, существенно отличающихся друг от друга по своим свойствам, составу и строению. Например, твердое вещество — лед — встречается в пяти различных кристаллических видах (фазах). От соотношения средней кинетической и средней потенциальной энергий частиц вещества зависит, в какой именно фазе оно будет находиться, а это соотношение в свою очередь зависит от внешних условий: от температуры и давления. При высоких температурах и низких давлениях вещество находится в газообразной фазе, промежуточные значения температуры и давления соответствуют жидкой фазе вещества. Таким образом, в конечном счете *фазовые превращения вещества обусловлены изменениями температуры и давления*.

Для описания условий существования фаз данного вещества общепринято пользоваться графиком с координатными осями T и p . Такой график называется *диаграммой состояний* или *диаграммой равновесия фаз*.

На рисунке 12 изображена примерная диаграмма состояний некоторого вещества.

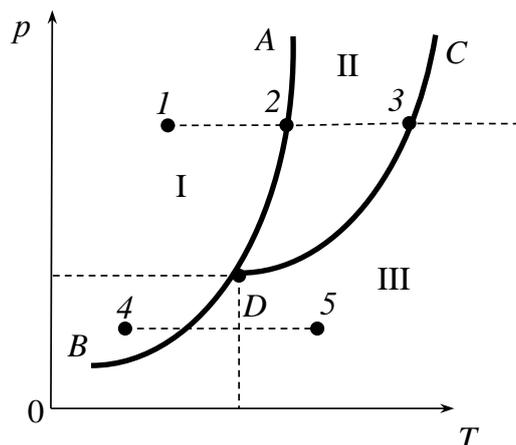


Рис. 12

Линиями AD , BD , CD поле диаграммы разделяется на три области, соответствующие условиям существования твердой I , жидкой II и газообразной III фаз. Линии диаграммы называются *кривыми фазового равновесия*. Они соответствуют условиям сколь угодно долгого сосуществования (равновесия) двух смежных фаз: кривая AD — сосуществованию твердого тела и жидкости, кривая CD — жидкости и газа, кривая BD — твердого тела и газа. Точка D называется *тройной*; она соответствует условиям сосуществования всех трех фаз вещества. Например, тройная точка воды соответствует одновременному существованию льда, воды и водяного пара, соприкасающихся между собой. Тройная точка воды характеризуется температурой $T = 273,16\text{ K}$ и давлением $p = 610,514\text{ Па}$.

Диаграмма равновесия фаз удобна для выяснения вопроса о том, в каком состоянии находится данное вещество при заданных условиях (p и T). Ответ получается сразу же после построения на диаграмме точки по заданным координатам (p , T). На диаграмме удобно изображать также процессы изменения состояния вещества. Например, изобарическое нагревание вещества, находящегося в твердом состоянии (точка 1), изображается прерывистой прямой, параллельной оси абсцисс. Эта прямая показывает, что при температуре, соответствующей точке 2 , тело начинает плавиться, при более высокой температуре превращается в жидкость, при температуре, соответствующей точке 3 , начинает превращаться в газ и при дальнейшем повышении температуры целиком переходит в газообразное состояние. Если же взять вещество в состоянии, изображаемом точкой 4 , и также подвергнуть изобарическому нагреванию, последовательность состояний 4 — 5 будет иной: вещество из твердого состояния превращается непосредственно в газ, минуя жидкую фазу (сублимация).

Испарение и конденсация. Кипение. В качестве примера фазовых превращений рассмотрим процессы испарения и конденсации. Средняя кинетическая энергия молекул жидкости зависит от температуры — возрастает с ее повышением. Однако в связи с хаотичностью теплового движения даже при невысокой температуре всегда имеются отдельные молекулы с повышенной скоростью, а следовательно, и с повышенной кинетической энергией. Они могут преодолеть силы притяжения со стороны других молекул и вылететь наружу — перейти в пар. Этот процесс называется *испарением*. Потеря молекул, обладающих большой кинетической энергией, ведет к уменьшению внутренней энергии жидкости. Чтобы испарение происходило при постоянной температуре, необходимо подводить к жидкости тепло извне. *Количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы жидкости в пар при данной температуре, называется удельной теплотой испарения λ при этой температуре.*

Например, для воды при 0°C $\lambda = 2,5 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$.

Испарение жидкости происходит при любой температуре. Очевидно, однако, что с повышением температуры интенсивность испарения должна возрастать, так как при этом повышается кинетическая энергия молекул, что облегчает им «прорыв» поверхностной пленки жидкости. По этой причине удельная теплота испарения должна уменьшаться с повышением температуры.

Хаотически движущиеся молекулы пара, подлетая к поверхности жидкости, могут попасть в сферу действия сил притяжения ее молекул и перейти в жидкость. Этот процесс называется *конденсацией*. При конденсации жидкость нагревается, так как влетающие в нее молекулы пара возвращают ей повышенную кинетическую энергию, унесенную при испарении. Удельная теплота конденсации равна удельной теплоте испарения.

Процессы испарения и конденсации идут одновременно. Если число молекул, покидающих жидкость за одну секунду, равно числу молекул, возвращающихся в нее за то же время из пара, то наступает динамическое равновесие: количество жидкости и пара остается неизменным. *Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, называется насыщенным*. На диаграмме состояний (рис. 12) этому состоянию соответствует кривая *CD*. Давление насыщенного пара возрастает с повышением температуры, так как при этом возрастает число вылетающих молекул (т.е. плотность пара) и их кинетическая энергия. Это также отражено на упомянутой диаграмме состояний (наклоном кривой *CD*).

Если давление насыщенного пара станет равным внешнему (атмосферному) давлению, то характер испарения существенно изменится: испарение будет происходить не только с поверхности жидкости, но и *во всем ее объеме*. Внутри жидкости начинают возникать пузырьки пара, всплывающие на поверхность и разрывающиеся над ней. Этот очень интенсивный процесс испарения называется *кипением*. Соответствующая ему температура называется *температурой кипения*.

Таким образом, температура кипения жидкости зависит от внешнего давления: возрастает с повышением давления.

Закипанию жидкости способствуют пузырьки воздуха, обычно находящиеся в ней. Эти пузырьки играют роль свободного пространства внутри жидкости, в котором происходит испарение. Пока давление в пузырьках остается меньшим внешнего давления, пузырьки воздуха находятся в сжатом состоянии. Когда же давление насыщенного пара становится равным внешнему давлению, пузырьки начинают быстро расширяться за счет суммарного давления пара и воздуха, устремляются вверх и прорывают поверхность жидкости. Жидкость, не содержащая пузырьков воздуха, закипает при некотором перегреве, причем кипение начинается у стенок сосуда, поскольку на них всегда имеется адсорбированный воздух.

До сих пор мы предполагали, что образующийся при испарении насыщенный пар остается над жидкостью. Если же этот пар будет уноситься в окружающее пространство (путем диффузии или благодаря воздушным потокам), то насыщения и динамического равновесия не наступит: жидкость будет все время испаряться, причем тем интенсивнее, чем быстрее уносится прочь ее пар. Такое явление имеет место, например, при испарении с открытых водных бассейнов. Особенно интенсивно идет испарение в жаркое время при сильном ветре.

Испарение и конденсация играют исключительно важную роль в процессах влагообмена и теплообмена на земном шаре. Благодаря испарению воды с поверхности водных бассейнов и с поверхности земли воздух всегда содержит некоторое (переменное) количество водяного пара. Воздух, как говорят, всегда влажен.

Влажность воздуха описывается следующими основными характеристиками.

1. *Абсолютная влажность a* — количество водяного пара, содержащееся в единице объема воздуха. Измеряется в г/м^3 .

2. *Максимальная влажность E* — количество водяного пара в единице объема воздуха, которое соответствовало бы насыщению при данной температуре. Максимальная влажность зависит только от температуры.

3. *Относительная влажность f* — выраженное в процентах отношение абсолютной влажности к максимальной влажности: $f = \frac{a}{E} \cdot 100\%$.

4. *Точка росы τ* — температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным. Она соответствует началу конденсации водяного пара.

При конденсации водяного пара в атмосфере образуются: на поверхности Земли и наземных предметах — роса, в приземном слое воздуха — туман, в свободной атмосфере — облака. Дождь, выпадающий из облаков, вновь возвращает на Землю испарившуюся с нее воду. Этот кругооборот воды сопровождается кругооборотом теплоты, поскольку в районах, где происходит испарение воды, поглощается огромное количество теплоты, а в районах, где происходит конденсация пара, эта теплота выделяется. Испарением, например, объясняется умеренность климата приморских районов.

Испарение и конденсация регулируют теплообмен и влагообмен животных и растительных организмов. Так, человеческий организм испаряет за сутки от одного до двух килограммов воды. Излишний нагрев организма сопровождается, как известно, обильным потовыделением. Испарение пота с поверхности кожи и сопутствующее ему поглощение теплоты предотвращают перегрев организма. Растения испаряют воду поверхностью листьев. В связи с этим растения засушливых районов имеют обычно маленькие и немногочисленные листья или даже совсем лишены их. Кроме того, листья этих растений зачастую бывают покрыты тончайшими серебристыми волосками, которые затрудняют «проветривание» поверхности листа и, следовательно, замедляют процесс испарения.

В разных случаях приходится считаться то с абсолютной, то с относительной влажностью. Так, например, кожное испарение зависит от относительной влажности — чем сильнее насыщен воздух парами, тем медленнее идет испарение. Испарение с поверхности легких зависит от абсолютной влажности. Дело в том, что выдыхаемый воздух имеет постоянную температуру в 32°C и полностью насыщен парами. Поэтому количество выводимого при выдохе пара будет равно тому количеству, которое насытит объем воздуха, введенного в легкие, без того количества пара, который в этом воздухе уже имелся.

Есть ли океаны на других планетах? *Океан* — это значительный слой жидкости на поверхности планеты, резкой границей отделенный от атмосферы. Поэтому температура хотя бы на части поверхности планеты должна быть выше температуры плавления того вещества, из которого океан состоит. Но этого недостаточно. Ведь если общая масса этого химического соединения на планете мала, то и при нужной температуре оно целиком может оказаться в атмосфере в виде газа. Следовательно, для существования океана нужно, чтобы парциальное давление какого-либо газа около поверхности планеты оказалось бы выше давления насыщенного пара.

Но и это еще не все. Для каждого соединения известны величины критического давления и критической температуры. При давлении выше критического или при температуре выше критической нет физической разницы между жидкостью и газом, не существует поверхности раздела между этими фазами, они непрерывно переходят друг в друга. Отсюда сразу следует, что ни на одной из планет Солнечной системы не может быть гелиевого или водородного океанов. Критическая температура гелия всего 5 К, водорода — только 33 К. Они ниже, чем температуры излучения всех планет. Гелий и водород, обильно присутствующие в атмосферах планет-гигантов, при погружении в их недра непрерывно, как на Солнце, переходят в плотные слои сильно сжатого вещества. Хотя оно там похоже на жидкость — расстояния между молекулами близки к размерам самих молекул — океаном его назвать нельзя: нет границы раздела с атмосферой.

По этой причине на Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне нет ни метанового, ни аммиачного океанов, хотя в атмосферах эти газы присутствуют в малых долях. На тех высотах, где парциальное давление, скажем метана, превзойдет давление его насыщенного пара, он начнет конденсироваться. Но не в океан. При общей малой его концентрации этот конденсат будет не слоем жидкости, не океаном, а слоем мелких капелек метана, метановым облаком. Единственным, кроме Земли, претендентом в Солнечной системе на настоящий океан остается спутник Сатурна Титан. В атмосфере Титана, кроме азота, составляющего большую ее часть, были обнаружены метан и синильная кислота HCN. Температура Титана 93 К выше температуры плавления метана 90 К и ниже его критической температуры, равной 191 К. А давление атмосферы у поверхности Титана в 1,6 раза больше давления земной атмосферы. При температуре 93 К давление насыщенных паров метана равно 0,16 атм. Следовательно, для существования метанового океана на Титане достаточно, чтобы общее содержание метана в верхних его слоях превышало 10%, что вполне реально.

§ 12. Свойства жидкостей

Молекулы вещества в жидком состоянии расположены вплотную друг к другу, как и в твердом состоянии. Поэтому объем жидкости мало зависит от давления. Постоянство занимаемого объема является свойством, общим для жидких и твердых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный им объем.

Возможность свободного перемещения молекул относительно друг друга обуславливает свойство текучести жидкости. Тело в жидком состоянии, как и в газообразном, не имеет постоянной формы. Форма жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил и сил поверхностного натяжения. Большая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях по сравнению с твердыми телами, обеспечивает возможность растворения твердых веществ в жидкостях.

С силами притяжения между молекулами и подвижностью молекул в жидкостях связано проявление *сил поверхностного натяжения*.

Внутри жидкости силы притяжения, действующие на одну молекулу со стороны соседних с ней молекул, взаимно компенсируются. Любая молекула, находящаяся у поверхности жидкости, притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости (притяжением молекул пара над жидкостью можно пренебречь в силу малой плотности последнего) (рис. 13). Под действием этих сил молекулы с поверхности жидкости уходят внутрь жидкости, и число молекул, находящихся на поверхности, уменьшается до тех пор, пока свободная поверхность жидкости не достигнет минимального из возможных в данных условиях значения. Минимальную поверхность среди тел данного объема имеет шар, поэтому при отсутствии или пренебрежимо малом действии других сил жидкость под действием сил поверхностного натяжения принимает форму шара.

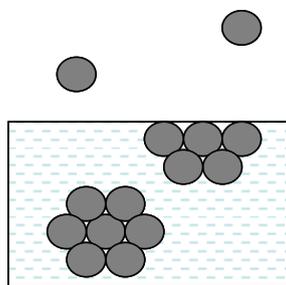


Рис. 13

Свойство сокращения свободной поверхности жидкости во многих явлениях выглядит таким образом, будто жидкость покрыта тонкой растянутой упругой пленкой, стремящейся к сокращению. Поверхностная пленка воды используется многими организмами в качестве опоры при движении. Наиболее известны водомерки, опирающиеся на воду только конечными члениками широко расставленных лапок.

Силой поверхностного натяжения называют силу, которая действует вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и стремится сократить ее до минимума.

Опыты показывают, что отношение модуля силы поверхностного натяжения, действующей на границу поверхностного слоя длиной l , к этой длине есть величина постоянная, не зависящая от длины. Эту величину называют *коэффициентом поверхностного натяжения* и обозначают буквой σ :

$$\sigma = \frac{F_n}{l}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения выражается в *ньютон на метр (Н/м)*. Поверхностное натяжение различно у разных жидкостей.

§ 13. Смачивание. Капиллярные явления

Смачивание — явление, возникающее вследствие взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел и приводящее к искривлению поверхности жидкости у поверхности твердого тела. Форма поверхности жидкости, соприкасающейся с твердым телом, зависит от того, какие силы притяжения больше: между молекулами жидкости и твердого тела или между молекулами самой жидкости. Свободная поверхность жидкости должна быть нормальной к тем силам, которые действуют на частицы жидкости, находящиеся в этой поверхности.

Иначе равновесие было бы невозможно, так как силы давали бы составляющие вдоль поверхности и частицы жидкости стали бы скользить в направлении этих составляющих. В средней части широких сосудов, где действуют только силы тяжести, поверхность жидкости горизонтальна. У стенок сосуда она всегда искривлена. Здесь образуются мениски, изображенные на рисунке 14. Частицы жидкости, лежащие около стенок, испытывают притяжения как со стороны стенки, так и со стороны остальных молекул жидкости. Если перевешивает притяжение стенки (рис. 14, а), равнодействующая сила R направлена к стенке. Она дает составляющую, направленную вдоль по поверхности жидкости к стенке. Под влиянием этой составляющей частицы жидкости скользят к стенке, громоздясь друг на друга, пока не образуется поверхность, нормальная к равнодействующей \vec{R} . Так образуется *вогнутый мениск*, характерный для жидкостей, *смачивающих* стенку.

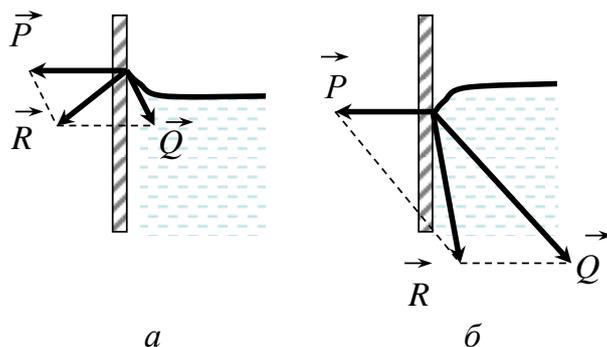


Рис. 14

В том случае когда берет перевес молекулярные силы жидкости (рис. 14, б), частицы около стенки отступают. Образуется *выпуклый мениск*, характерный для жидкостей, *не смачивающих* стенок.

В широких сосудах мениски, захватывающие только небольшую поверхность у самых стенок, не изменяют давления жидкости. В узких же сосудах, например в тоненьких трубочках (капиллярах), мениск захватывает всю поверхность и влияет, таким образом, на давление жидкости, которое меняется под кривой поверхностью.

Величина внутреннего, молекулярного давления жидкости зависит от формы ее поверхности. Действительно, рассмотрим молекулу a , находящуюся на одинаковой глубине под вогнутой, горизонтальной и выпуклой поверхностями (рис. 15).

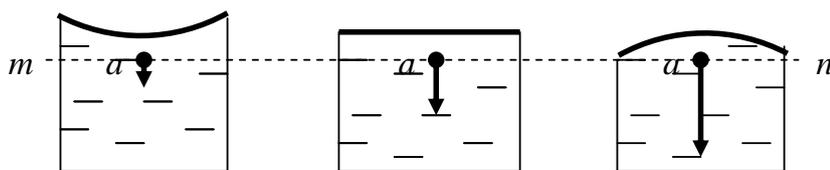


Рис. 15

Все молекулы, находящиеся ниже уровня mn , тянут нашу молекулу книзу, а находящиеся выше этого уровня тянут ее кверху. Из рисунка видно, что при вогнутой поверхности количество молекул, тянущих кверху, больше, а при выпуклой поверхности — меньше, чем при горизонтальной. Значит, давление под вогнутой поверхностью меньше, а под выпуклой больше, чем под горизонтальной.

Под *капиллярными явлениями* понимают подъем или опускание жидкости в капиллярах по сравнению с уровнем жидкости в широких трубах.

Если опустить капилляр в широкий сосуд с жидкостью, то возможны два варианта. В том случае когда жидкость смачивает стенки капилляра, она поднимется в трубке на некоторую высоту h над уровнем в широком сосуде. Если аналогичный опыт провести с жидкостью, не смачивающей стенок трубки, то окажется, что уровень жидкости в капилляре будет ниже, чем в широком сосуде (рис. 16).

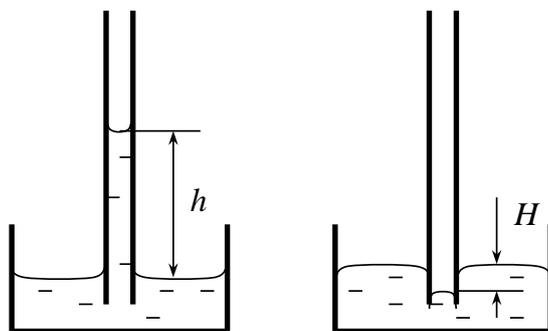


Рис. 16

При полном смачивании жидкостью поверхности твердого тела силу поверхностного натяжения можно считать направленной вдоль поверхности твердого тела перпендикулярно к границе соприкосновения твердого тела и жидкости. В этом случае подъем жидкости вдоль смачиваемой поверхности продолжается до тех пор, пока сила тяжести \vec{F}_m , действующая на столб жидкости в капилляре и направленная вниз, не станет равной по модулю силе поверхностного натяжения \vec{F}_n , действующей вдоль границы соприкосновения жидкости с поверхностью капилляра (рис. 17):

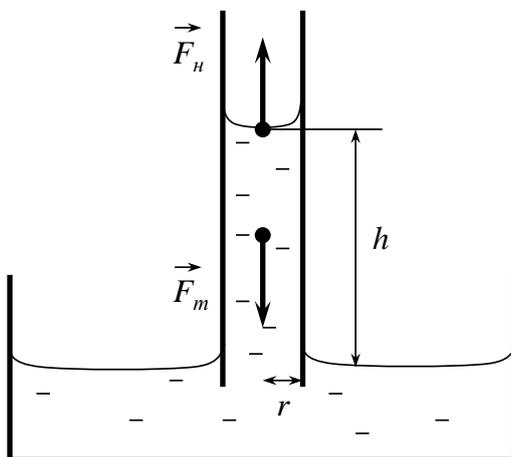


Рис. 17

$$F_m = F_n, \quad F_m = mg = \rho h \pi r^2 g, \\ F_n = \sigma l = \sigma 2\pi r.$$

Отсюда получаем, что высота подъема жидкости в капилляре тем больше, чем меньше радиус капилляра. Кроме того, высота подъема зависит от свойств самой жидкости — ее поверхностного натяжения и плотности:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

где σ — поверхностное натяжение, ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, r — радиус капилляра.

Жидкость, не смачивающая стенку капилляра, опускается на расстояние H , определяемое по той же формуле.

Капиллярное поднятие наблюдается, конечно, не только в тонких трубочках с круговым сечением, но в любых узких каналах, трещинах, щелях и порах. В биологии капиллярные явления играют весьма важную роль, так как большинство растительных и животных тканей пронизано громадным количеством капиллярных сосудов.

Газовая эмболия. Пузырек газа, попавший в капилляр, оказывает значительное сопротивление движению жидкости; цепочка из пузырьков может совершенно закупорить капилляр.

ляр. Посмотрим, отчего это происходит. На рисунке 18, *a* вверху изображена капля воды в узком стеклянном капилляре. Она ограничена с обеих сторон одинаковыми менисками.

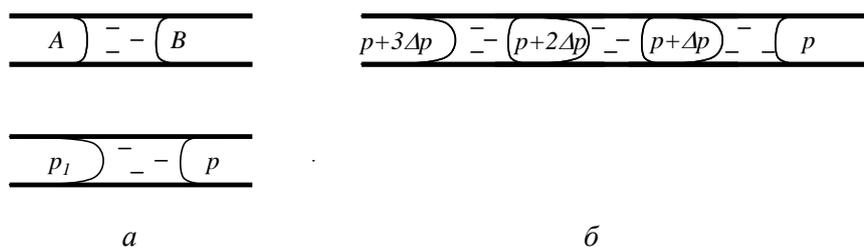


Рис. 18

Если в пространстве *A* несколько увеличить давление, то прилипшая к стенкам капля остается неподвижной, но ограничивающие ее мениски деформируются так, как изображено на нижнем рисунке. Радиус кривизны левого мениска r_l становится меньше радиуса кривизны r правого мениска. Оба мениска, стремясь восстановить нормальную для них форму, развивают силу, действующую на каплю влево. При увеличении разности давлений $p_l - p$ деформация менисков увеличивается, и когда разность давлений превзойдет определенный предел Δp , капля начнет двигаться. Итак, благодаря поверхностным силам капля воды в капилляре начнет двигаться только в том случае, если разность давлений на ограничивающие ее мениски будет больше Δp . Чем уже капилляр и чем больше поверхностное натяжение, тем большая разность давлений необходима для того, чтобы привести каплю в движение.

Рассмотрим теперь цепочку из трех капель (рис. 18, *б*). При распределении давлений, указанном на рисунке, капли будут неподвижны. Значит, цепочка придет в движение только при условии, что разность давлений на ее концах будет больше $3\Delta p$. Узкие капилляры с большим числом пузырьков воздуха в них оказываются непроходимыми даже при разности давлений в несколько атмосфер. Вот почему, впрыскивая растворы лекарственных веществ в вену человека, надо следить за тем, чтобы в шприце не оставалось пузырьков воздуха.

Организм человека может приспособиться к изменению атмосферного давления в широких пределах: от 0,5 до 8 атм. Переход от низких давлений к высоким может быть совершен быстро без вреда для организма. Обратный переход при большой разности давлений должен совершаться очень медленно, в течение нескольких часов. Дело в том, что в крови и других тканевых жидкостях всегда имеются растворенные газы, количество которых пропорционально давлению окружающего воздуха. Если давление внезапно уменьшается, то растворенные газы выделяются в виде мельчайших пузырьков, подобно тому как это происходит при откупоривании бутылок с газированными напитками. Выделяющиеся в тканях газы могут вызвать тяжелые расстройства, в частности закупорку мелких сосудов (эмболию). Неосторожный переход от высокого к низкому давлению может повлечь за собой смертельный исход.

§ 14. Осмос

При растворении в жидкости твердого вещества его молекулы равномерно распределяются во всем объеме жидкости, образуя среду, называемую *раствором*; жидкость называется *растворителем*, твердое вещество — *растворенным веществом*. Масса m растворенного вещества, приходящаяся на единицу объема V раствора, называется *концентрацией раствора* C :

$$C = \frac{m}{V}.$$

Растворы малой концентрации называются слабыми или разбавленными. В этом случае размеры молекул растворенного вещества малы по сравнению с расстояниями между ними, поэтому взаимодействия между этими молекулами практически не будет. Таким образом, в слабом растворе растворенное вещество напоминает собой идеальный газ с той лишь разницей, что в растворе свобода движения молекул растворенного вещества ограничена присутствием молекул растворителя. Отмеченная аналогия наводит на мысль о возможности применения к растворенному веществу законов идеального газа. В частности, можно предположить, что растворенное вещество обладает парциальным давлением p , которое по основному урав-

нению кинетической теории газа и по закону Менделеева — Клапейрона выражается формулами

$$p = \frac{2}{3} n_0 W_{cp}$$

и

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V},$$

где в данном случае n_0 — концентрация молекул растворенного вещества (число молекул растворенного вещества в единице объема раствора), W_{cp} — средняя кинетическая энергия молекулы растворенного вещества, m и M — масса растворенного вещества и его молярная масса, V и T — объем и температура раствора, R — универсальная газовая постоянная.

Для того чтобы обнаружить это давление, необходимо отделить раствор от чистого растворителя так называемой полупроницаемой перегородкой, пропускающей молекулы растворителя, но не пропускающей молекулы растворенного вещества. Для водного раствора сахара такой перегородкой являются, например, кишечная ткань и некоторые пластмассовые пленки. Поры в этих перегородках столь малы, что через них могут пройти молекулы воды, но не пройдут более крупные молекулы сахара.

Рассмотрим следующую экспериментальную установку. В воронку, раструб которой затянут целлофаном, налит слабый водный раствор сахара. Воронка установлена в сосуде с чистой водой (рис. 19) так, что уровни жидкостей в воронке и в сосуде совпадают.

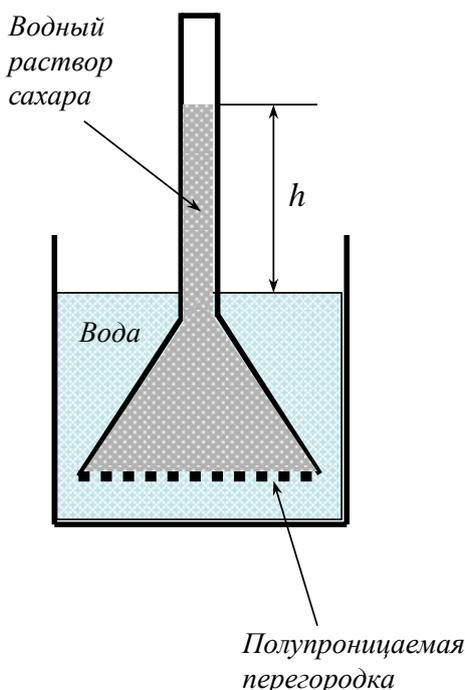


Рис. 19

Через некоторое время уровень раствора в воронке начнет медленно повышаться и, наконец, установится над уровнем воды в сосуде на высоте h . Происходит это по следующей причине. Концентрация молекул воды в сосуде больше концентрации молекул воды в воронке на величину концентрации молекул сахара. Поэтому через полупроницаемую перегородку диффундирует больше молекул воды из сосуда в воронку, чем в обратном направлении, что вызывает подъем жидкости в воронке. Молекулы же сахара не могут перейти через полупроницаемую перегородку из воронки в сосуд. В результате концентрации молекул воды в воронке и в сосуде уравниваются, а концентрации молекул сахара останутся различными: n_0 — в воронке и нуль — в сосуде. Избыточная концентрация n_0 молекул сахара создаст парциальное давление растворенного вещества, уравновешиваемое гидростатическим давлением столбика раствора высотой h :

$$p = \rho gh,$$

где ρ — плотность раствора, g — ускорение силы тяжести.

Рассмотренное явление диффузии растворителя через полупроницаемую перегородку, отделяющую раствор от чистого растворителя, называется *осмосом*, а возникающее при этом в растворе избыточное давление (равное парциальному давлению растворенного вещества) называется *осмотическим давлением*.

Используя закон Менделеева — Клапейрона и определение концентрации раствора, получим:

$$p = \frac{CRT}{M}.$$

Осмотическое давление пропорционально концентрации и температуре раствора и обратно пропорционально молярной массе растворенного вещества. Этот закон был установлен в 1887 г. голландским химиком Вант-Гоффом. Следует подчеркнуть, что по закону Вант-Гоффа осмотическое давление не зависит от свойств растворителя.

Явление осмоса играет исключительную роль в жизни растительных и животных организмов. Оболочки живых клеток представляют собой полупроницаемые перегородки: они проницаемы для молекул воды и непроницаемы для молекул сложных органических соединений, создающихся внутри клетки в процессе ее жизнедеятельности. Благодаря этому внутри клетки образуется раствор и возникает осмотическое давление, делающее клетку упругой, как надутый резиновый мяч. Понятно, что построенные из таких клеток растительные и животные ткани будут обладать большой упругостью и приобретут способность сохранять свою форму. В биологии это обусловленное осмосом явление носит название *тургора клеток*.

Если клетка организма граничит с концентрированным водным раствором вещества, для которого оболочка клетки непроницаема, то вода переходит из клетки в этот раствор. Происходит так называемое осмотическое высасывание воды из клетки. Именно им обусловлено чувство жажды, возникающее после приема сладкой пищи.

Посредством таких физиологических процессов, как питание, выделение, дыхание и т.п., поддерживается постоянное осмотическое давление в клетках животных организмов (осморегулирование).

§ 15. Кристаллические тела

Благодаря тому что молекулы твердого тела связаны между собой прочнее, чем молекулы жидкости, для твердого тела в отличие от жидкости характерно постоянство не только объема, но и формы. Рассмотрим несколько подробнее вопрос о кристаллическом строении твердого тела.

Характерным внешним признаком кристалла является его геометрически правильная форма (рис. 20). Так, например, кристалл поваренной соли имеет форму куба (*а*), кристалл льда — форму шестигранной призмы (*б*), кристалл алмаза — форму октаэдра (восьмигранника, *в*) и т.д.

У каждого кристаллического вещества угол между ограничивающими его поверхностями (гранями) имеет строго определенное значение (у поваренной соли — 90° , у льда — 120° и т.п.). Кристаллы легко раскалываются по определенным плоскостям, называемым *плоскостями спайности*.

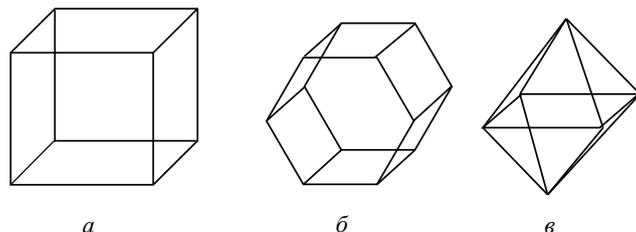


Рис. 20

При этом получают кристаллики меньшего размера, но той же формы. Так, при дроблении кристалла поваренной соли образуются мелкие кубики и прямоугольные параллелепипе-

ды. Отмеченные факты навели в свое время на мысль о том, что кристаллическое тело построено из *элементарных ячеек* (кубиков, или шестигранных призм, или октаэдров и т.п.), *плотно приложенных друг к другу*. А это означает, что в кристаллическом теле частицы (молекулы, или атомы, или ионы) расположены в строго симметричном порядке относительно друг друга, образуя *пространственную, или кристаллическую, решетку*; места расположения частиц называются *узлами решетки*. Эта гипотеза была высказана в 1848 г. французским ученым Браве.

Примером простейшей пространственной решетки может служить кристаллическая решетка поваренной соли $NaCl$ (рис. 21, *a*). Ее элементарная ячейка с ребром a (выделена на рисунке жирными линиями) образована положительными ионами натрия и отрицательными ионами хлора, расположенными в вершинах куба.

Формы пространственных решеток могут быть разнообразными, но не любыми: необходимо, чтобы элементарные ячейки, составляющие решетку, вплотную, без зазоров прикладывались друг к другу, что соответствует минимуму потенциальной энергии решетки. Требуемым образом можно, например, уложить кубические ячейки и ячейки в виде шестигранных призм (рис. 21, *б* и *в*), но нельзя уложить ячейки в виде пятигранных призм (рис. 21, *г*).

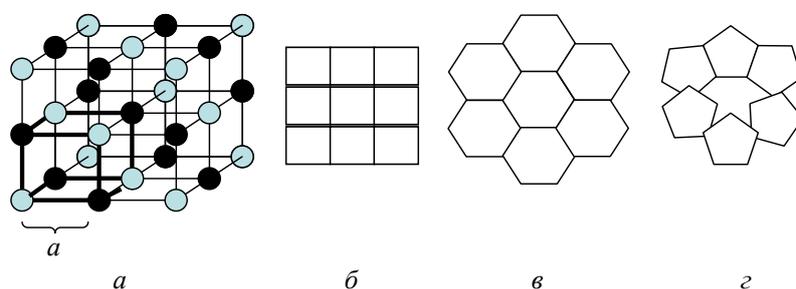


Рис. 21

В 1890 г. Е. С. Федоров теоретически рассчитал все возможные формы кристаллических решеток, ячейки которых допускают плотную упаковку, и установил, что в природе может существовать только 230 различных видов кристаллических решеток, образующих 32 класса симметрии. Проведенные в дальнейшем исследования кристаллов с помощью рентгеновских лучей подтвердили данное теоретическое предположение. На рисунке представлены некоторые простые кристаллические решетки: простая кубическая (рис. 22, *a*), гранецентрированная кубическая (рис. 22, *б*), объемноцентрированная кубическая (рис. 22, *в*) и гексагональная (рис. 22, *г*).

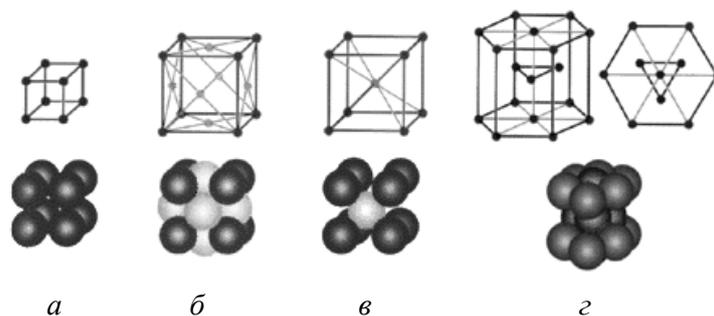


Рис. 22

Симметричность расположения частиц в кристаллической решетке обусловлена тем, что в этом случае силы взаимодействия (притяжения и отталкивания) между частицами уравниваются. При этом потенциальная энергия частиц минимальна.

Расстояния между частицами в кристалле малы — порядка размера самих частиц (10^{-10} м). Такого же порядка и расстояние между молекулами в жидкости, поскольку, как известно, при плавлении кристалла не происходит существенного увеличения его объема.

Замечательной особенностью кристалла является его *анизотропия*; *в различных направлениях кристалл обладает различными физическими свойствами*. Так, например, всем без ис-

ключения кристаллам присуща анизотропия прочности; подавляющее большинство кристаллов анизотропно в отношении теплопроводности, электропроводности, лучепреломления и т.п. Анизотропия кристаллов объясняется в основном тем, что в пространственной решетке оказывается различным число частиц, приходящихся на одинаковые по длине, но различные по направлению отрезки, как это показано на рисунке 23 (на горизонтальном отрезке решетки 8 частиц, на наклонном — 6 частиц, на другом наклонном — 3 частицы).

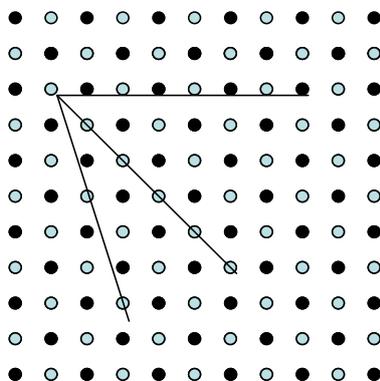


Рис. 23

Понятно, что различие в плотности расположения частиц кристаллической решетки по различным направлениям должно приводить и к различию во многих других свойствах по этим направлениям кристалла.

Кристаллическое состояние весьма распространено в природе: большинство твердых тел (минералы, металлы, растительные волокна, белковые вещества, сажа, резина и т.д.) являются кристаллами. Однако не у всех этих тел одинаково отчетливо выражены рассмотренные ранее кристаллические свойства. В этом отношении тела подразделяются на две группы: *монокристаллы* и *поликристаллы*. Монокристалл — тело, все частицы которого укладываются в одну общую пространственную решетку. Монокристалл анизотропен. Монокристаллами является большинство минералов. Поликристалл — тело, состоящее из множества мелких монокристалликов, беспорядочно расположенных друг относительно друга. Поэтому поликристаллы изотропны, т.е. обладают одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям. Примером поликристаллов могут служить металлы. Однако металл можно получить и в виде монокристалла, если обеспечить медленное охлаждение расплава, предварительно введя в него один кристаллик данного металла. Вокруг этого «зародыша» и будет расти металлический монокристалл.

В зависимости от того, из каких именно частиц образована кристаллическая решетка, различают четыре основных группы решеток: ионную, атомную, молекулярную и металлическую.

Ионная решетка образована разноименно заряженными ионами, удерживаемыми в узлах решетки электрическими силами. Ионную решетку имеет большинство кристаллов.

Атомная решетка образована нейтральными атомами, удерживаемыми в узлах решетки химическими (валентными) связями: у соседних атомов обобществлены внешние (валентные) электроны. Атомную решетку имеет, например, графит.

Молекулярная решетка образована полярными (дипольными) молекулами, удерживаемыми в узлах решетки также электрическими силами. Однако для полярных молекул действие этих сил сказывается слабее, чем для ионов. Поэтому вещества с молекулярной решеткой сравнительно легко деформируются. Молекулярную кристаллическую решетку имеет большинство органических соединений (целлюлоза, резина, парафин и т.п.).

Металлическая решетка образована положительными ионами металла, окруженными свободными электронами. Эти электроны и связывают между собой ионы металлической решетки. Такая решетка свойственна металлам.

Принято считать твердыми телами именно кристаллические тела. Жидкостям, как уже отмечалось, свойственно беспорядочное расположение частиц, поэтому жидкости изотропны. Некоторые жидкости могут быть сильно переохлаждены, не переходя при этом в твердое (кристаллическое) состояние. Однако вязкость таких жидкостей столь огромна, что они прак-

тически теряют текучесть, сохраняя, как и твердые тела, свою форму. Подобные тела называются *аморфными*. К аморфным телам относятся, например, вар, стекло, смола, канифоль и т.п. Понятно, что аморфные тела изотропны. Следует, однако, иметь в виду, что аморфные тела могут с течением времени (длительного) переходить в кристаллическое состояние. Так, в стекле с течением времени появляются кристаллики: оно начинает мутнеть, превращаться в поликристаллическое тело.

Вопрос о происхождении большинства кристаллов тесно связан с происхождением и развитием Земли. Согласно современным представлениям, Земля образовалась путем объединения первоначально холодного вещества, имевшегося в Солнечной системе в виде твердых частиц пыли. За счет выделения энергии при столкновении частиц, а также за счет ряда других источников энергии Земля должна была разогреться до 1000—2000°C. При такой высокой температуре слои, близкие к поверхности и не сжатые давлением вышележащих слоев, должны были расплавиться. В этом расплавленном слое произошло разделение пород: менее плотные породы типа гранитов всплыли на поверхность, под ними расположился слой более плотных базальтов и еще ниже — породы, слагающие мантию. Газы, освободившиеся при расплавлении вещества верхнего слоя земного шара, образовали атмосферу Земли. При последующем остывании Земли расплавленные слои затвердели и образовали земную кору, пары воды после конденсации из атмосферы создали Мировой океан.

Многие минералы и горные породы образовались при охлаждении земной коры, подобно тому как образуется лед при замерзании воды. Магма, вещество земной коры в расплавленном состоянии, представляет собой сложный расплав различных веществ, насыщенный различными горячими газами и парами. При охлаждении магмы сначала в ней образовались кристаллы вещества, температура кристаллизации которого самая высокая. По мере дальнейшего охлаждения происходила кристаллизация других минералов, обладающих меньшей температурой кристаллизации, и так до тех пор, пока вся магма не затвердела. Так, в частности, могли образоваться такие распространенные породы, как граниты.

Рассматривая зернистую поверхность гранита, можно сделать вывод, какой из входящих в его состав минералов образовался раньше других. Зерна этого минерала крупнее и имеют форму, близкую к форме правильных кристаллов, так как им не мешали расти кристаллы других минералов.

При затвердевании объем земной коры уменьшался, и в ней появлялись трещины и пустоты. В таких пустотах рост кристаллов происходил беспрепятственно. В них часто находят крупные и хорошо ограненные кристаллы кварца, пластинчатые кристаллы слюды площадью в несколько квадратных метров и др.

Многие минералы возникли из перенасыщенных водных растворов. Первым среди них следует назвать каменную соль *NaCl*, являющуюся одним из наиболее знакомых каждому человеку минералов. Толщина пластов каменной соли, образовавшихся при испарении воды соленых озер, достигает в некоторых месторождениях нескольких сотен метров.

Примером образования в природе кристаллов из пара является образование снежинок из паров воды.

Кристалл обычно служит символом неживой природы. Однако грань между живым и неживым установить очень трудно, и понятия «кристалл» и «жизнь» не являются взаимоисключающими. Простейшие живые организмы — вирусы — могут соединяться в кристаллы. Конечно, в кристаллическом состоянии они не обнаруживают никаких признаков живого, так как сложные жизненные процессы в кристаллах протекать не могут. Но при изменении внешних условий на благоприятные вирусы начинают двигаться, размножаться.

Кристалл и живой организм представляют собой примеры осуществления крайних возможностей в природе. В кристалле неизменными остаются не только сами атомы и молекулы, но также их взаимное расположение в пространстве. В живом организме не только не существует сколько-нибудь постоянной структуры в расположении атомов и молекул, но ни на одно мгновение не остается неизменным его химический состав. В процессе жизнедеятельности организма одни химические соединения разлагаются на более простые, другие, наоборот, синтезируются из простых.

Но при всех химических процессах, протекающих в живом организме, организм остается самим собой в течение десятков лет. Следовательно, в клетках любого животного и растения имеется что-то постоянное, неизменное, способное управлять химическими процессами, про-

текающими в них. Такими носителями «программы» процессов, протекающих в живой клетке, оказались молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). В клетках человеческого организма одна такая молекула имеет длину несколько сантиметров. Имея очень малую толщину, молекула укладывается спирально, клубками внутри клеток, видимых лишь в микроскоп.

Молекулы ДНК не только управляют процессами жизнедеятельности клетки, но и несут в себе полную информацию о строении и развитии всего живого организма из одной клетки. С полным основанием можно сказать, что молекула ДНК является основой жизни, носителем всех наследственных признаков организма.

Молекулы ДНК с точки зрения физики рассматриваются как особый вид твердого тела — одномерный аперриодический кристалл. Следовательно, кристаллы — это не только символ неживой природы, но и основа жизни на Земле.

§ 16. Механические свойства твердых тел

Внешнее механическое воздействие на тело вызывает смещение атомов из равновесных положений и приводит к изменению формы и объема тела, т.е. к его деформации. Среди деформаций, возникающих в твердых телах, можно выделить пять основных видов: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб. Для демонстрации этих видов деформаций можно воспользоваться моделью, состоящей из нескольких пластин, скрепленных пружинами (на рисунке пружины не изображены) (рис. 24). Каждая пластина изображает слой атомов (молекул) в кристаллической решетке, пружины моделируют действие сил связи.

Интересно, что на примере человека можно проследить почти все виды деформации. Деформации сжатия испытывают позвоночный столб, нижние конечности и покровы ступни. Деформации растяжения — верхние конечности, связки, сухожилия, мышцы; изгиба — позвоночник, кости таза, конечностей; кручения — шея при повороте головы, туловище в пояснице при повороте, кисти рук при вращении и т.д.

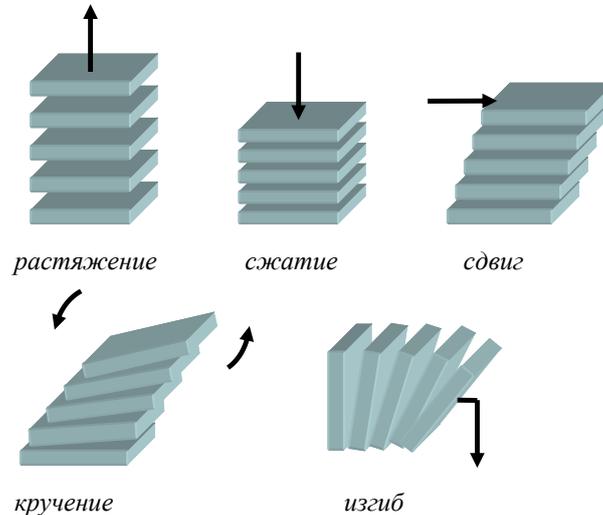


Рис. 24

Самые простые виды деформации — растяжение и сжатие. Деформацию сжатия и растяжения можно характеризовать *абсолютным удлинением* Δl , равным разности длин образца до растяжения l_0 и после него l :

$$\Delta l = l - l_0.$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, при сжатии имеет отрицательное значение.

Отношение абсолютного удлинения Δl к длине образца l_0 называется *относительным удлинением* ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

При деформации тела возникают силы упругости. Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости к площади сечения тела, называется *механическим напряжением* σ :

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

За единицу механического напряжения в СИ принят паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

При малых деформациях напряжение прямо пропорционально относительному удлинению:

$$\sigma = E|\varepsilon|.$$

Коэффициент пропорциональности E называется *модулем упругости (модулем Юнга)*. Модуль упругости одинаков для образцов любой формы и размеров, изготовленных из одного материала:

$$E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|} = \frac{Fl_0}{|\Delta l|S} = \text{const}.$$

Модуль упругости для кости или сухожилия при растяжении очень велик, а для мышц, вен, артерий он очень мал.

Из последней формулы следует, что

$$F = \frac{ES}{l_0}|\Delta l|.$$

Сравнив это выражение с законом Гука ($F=k|\Delta l|$), получим, что жесткость k стержня пропорциональна произведению модуля Юнга на площадь поперечного сечения стержня и обратно пропорциональна его длине.

Зависимость напряжения σ от относительного удлинения ε является одной из важнейших характеристик механических свойств твердых тел. Графическое изображение этой зависимости называется *диаграммой растяжения* (рис. 25).

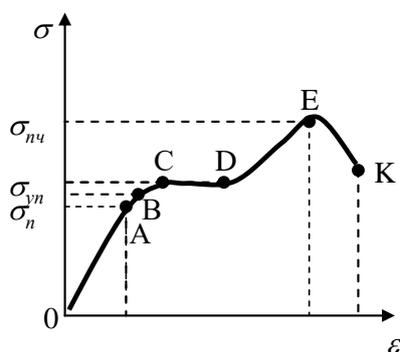


Рис. 25

Закон Гука выполняется при небольших деформациях. Максимальное напряжение σ_n , при котором еще выполняется закон Гука, называется *пределом пропорциональности*. За пределом пропорциональности (точка A) напряжение перестает быть пропорциональным относительному удлинению; до некоторого напряжения после снятия нагрузки размеры тела восстанавливаются полностью. Такая деформация называется *упругой*. Максимальное напряжение σ_{yn} , при котором деформация еще остается упругой, называется *пределом упругости* (точка B). Большинство металлов испытывает упругую деформацию до значений $\varepsilon \leq 0,1\%$.

При напряжениях, превышающих предел упругости σ_{yn} , образец после снятия нагрузки не восстанавливает свою форму или первоначальные размеры. Такие деформации называются остаточными, или *пластическими*.

В области пластической деформации (участок CD) деформация происходит почти без увеличения напряжения. Это явление называется текучестью материала.

Материалы, у которых область текучести CD значительна, могут без разрушения выдерживать большие деформации. Если же область текучести материала почти отсутствует, он без разрушения сможет выдержать лишь небольшие деформации. Такие материалы называются хрупкими. Примерами хрупких материалов могут служить стекло, кирпич, бетон, чугун.

За пределом текучести кривая напряжений поднимается и достигает максимума в точке E . Напряжение, соответствующее точке E , называется *пределом прочности* $\sigma_{пр}$. После точки E кривая идет вниз и дальнейшая деформация вплоть до разрыва (точка K) происходит при все меньшем напряжении.

При прогибе происходит растяжение материала по выпуклой его стороне и сжатие по вогнутой; средние части заметной деформации не испытывают. Поэтому в технике сплошные брусья заменяют трубами, балки делают тавровыми; это экономит материал и уменьшает вес установок. Как известно, трубчатое строение имеют кости конечностей и стебли быстрорастущих растений — злаков, зонтичных и т.п. Молодые, неокрепшие листья злаков всегда свернуты в трубочку.

Конструкции, подобные тавровой балке, встречаются в грудине птиц; в раковинах многих моллюсков, живущих в полосе прибой. Балка, скобообразно изогнутая кверху и имеющая надежные опоры, не допускающие раздвигания ее концов (арка), обладает огромной прочностью по отношению к усилиям, действующим на ее выпуклую сторону (архитектурные своды, бочки; а в организмах — череп, грудная клетка, оболочки яиц, орехов, панцири жуков, раков, черепах и т.п.).

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Каковы основные положения молекулярно-кинетической теории? Приведите примеры опытного обоснования этих положений.

2. Каким условиям удовлетворяет идеальный газ? Освойте вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа. В чем содержание и какова цель вывода данного уравнения?

3. Что такое абсолютная температура? Изобразите графически, как связана температура по шкале Цельсия с абсолютной температурой?

4. Как выражается средняя квадратичная скорость молекул через абсолютную температуру газа и его молярную массу?

5. Запишите уравнение Менделеева — Клапейрона. Получите из него законы изопроцессов. Заполните таблицу схематичными изображениями графиков изопроцессов в различных системах координат.

Изопроцессы	Система координат		
	$p - V$	$p - T$	$V - T$
Изотермический			
Изобарный			
Изохорный			

6. Как уравнение Ван-дер-Ваальса объясняет основные отличия в поведении реального газа от идеального? Используя интернет-ресурсы, выясните, какие более сложные уравнения реального газа используются на практике.

7. Составьте терминологический словарь по теме «Агрегатные состояния и фазовые переходы».

8. Почему свойства всех газов почти одинаковы, а свойства жидкостей и твердых тел столь различны? Ответ сопроводите схематическим изображением расположения и поведения молекул в веществе.

9. В чем проявляется явление смачивания? Приведите примеры капиллярных явлений в природе.

10. Что понимают под осмотическими явлениями? Используя интернет-ресурсы, познакомьтесь с понятием обратного осмоса. Просмотрите видеоролик, в котором представлен принцип действия фильтра для воды, работающего на явлении обратного осмоса (<http://www.youtube.com/watch?v=aMJGY633KG0>). На основе фильма и интернет-ресурсов по проблеме, подобранных Вами самостоятельно, сделайте вывод о пользе/вреде употребления обратнo-осмотической воды. Для этого заполните таблицу.

Аргументы «за»	Аргументы «против»	Мое мнение

11. Составьте тезисы по параграфу «Кристаллические тела». Для этого составьте план текста; прочитайте фрагмент текста, который имеет свой подзаголовок — первый пункт плана; уясните его суть; сформулируйте первый тезис; аналогичную работу проделайте с остальными фрагментами текста. Напомним, что тезис — это краткое положение, отражающее смысл значительной части текста. Представьте работу в форме, указанной ниже.

План	Тезисы
1.	1.
2.	2.
...	...

12. Используя интернет-ресурсы, выберите наиболее удачный, на Ваш взгляд, опорный конспект по теме «Механические свойства твердых тел». Какие изменения и дополнения Вы хотели бы в него внести?

**§ 17. Внутренняя энергия идеального газа.
Первый закон термодинамики**

Термодинамика — это теория тепловых явлений, в которой не учитывается атомно-молекулярное строение тел. Для описания явлений в термодинамике используются понятия «термодинамическая система» и «термодинамический процесс». Совокупность физических тел, изолированных от взаимодействия с другими телами, называют изолированной *термодинамической системой*.

Любое изменение, происходящее в термодинамической системе, называется *термодинамическим процессом*.

Тело, как система из составляющих его частиц, обладает внутренней энергией. С позиций молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия — это сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, составляющих тело, и кинетической энергии их беспорядочного теплового движения.

Кинетическая энергия беспорядочного движения частиц пропорциональна температуре, потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояний между частицами, т.е. от объема тела. Поэтому в термодинамике внутренняя энергия тела определяется как функция его макроскопических параметров, например температуры и объема:

$$U = U(T, V).$$

Вычислим внутреннюю энергию идеального газа. Если потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю, внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий хаотического теплового движения всех его молекул:

$$U = NW_{cp} = \nu N_a \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Данное выражение справедливо для одноатомного газа. В общем случае внутренняя энергия газа определяется числом степеней свободы молекул i :

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Так, одноатомная молекула обладает тремя степенями свободы поступательного движения ($i = 3$); двухатомная (рис. 26) — тремя степенями свободы поступательного движения и двумя вращательного движения ($i = 5$).

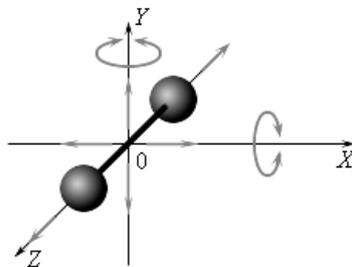


Рис. 26

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Следовательно, при изменении температуры идеального газа обязательно изменяется его внутренняя энергия.

Внутренняя энергия тела может изменяться только в результате его взаимодействия с другими телами. При механическом взаимодействии тел мерой энергии, переданной от одного

тела к другому, является работа A . При осуществлении теплопередачи от одного тела к другому мерой переданной энергии является количество теплоты Q . Совершение механической работы называется *макроскопическим* способом передачи энергии, а теплопередача — *микроскопическим*.

Термодинамика построена в основном на двух фундаментальных законах, полученных из многовекового опыта человеческой деятельности и называемых *началами термодинамики*. *Первое начало* описывает количественную и качественную стороны процессов превращения энергии; *второе начало* позволяет судить о направлении этих процессов.

Рассмотрим три тела — 1, 2, и 3. Пусть между телом 1 и телом 2 осуществляется теплопередача, а между телом 1 и телом 3 происходит механическое взаимодействие. При теплопередаче количества теплоты Q внутренняя энергия тела 2 изменится на $\Delta U_2 = -Q$, а внутренняя энергия тела 3 в результате совершения работы изменится на $\Delta U_3 = -A$. В результате теплопередачи и механического взаимодействия внутренняя энергия каждого из трех тел изменится, но в изолированной термодинамической системе, в которую входят все три тела, по закону сохранения и превращения энергии внутренняя энергия U остается неизменной. Следовательно, сумма изменений внутренней энергии тел 1, 2 и 3 равна нулю:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = 0.$$

Отсюда изменение внутренней энергии тела 1 равно сумме изменений внутренней энергии взаимодействующих с ним тел 2 и 3, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta U_1 = -\Delta U_2 - \Delta U_3$$

или

$$\Delta U_1 = Q + A.$$

Так как тело 1 является неизолитрованной термодинамической системой, можно сделать общий вывод: *в неизолитрованной термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно сумме количества теплоты Q , переданного системе, и работы A внешних сил над этой системой:*

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

Это выражение закона сохранения и превращения энергии называется *первым законом термодинамики*.

Вместо работы A , совершаемой внешними силами над термодинамической системой, часто удобнее бывает рассматривать работу A^* , совершаемую термодинамической системой над внешними телами. Так как эти работы равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку:

$$A = -A^*,$$

то первый закон термодинамики имеет второе выражение:

$$\Delta U = Q - A^*.$$

В неизолитрованной термодинамической системе изменение внутренней энергии ΔU равно разности между полученным количеством теплоты Q и работой A^ , совершаемой системой.*

Если система *периодически* возвращается в исходное состояние, то изменение ее внутренней энергии $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому началу термодинамики,

$$Q = A^*.$$

Это означает, что невозможно создать периодически действующий механизм, который совершал бы работу, превышающую получаемую им энергию. Воображаемый механизм, совершающий работу, большую получаемой энергии, называется *вечным двигателем первого рода*. Поэтому первому началу термодинамики можно еще дать и такую формулировку: *вечный двигатель первого рода невозможен*. В этой связи интересно отметить, что открытие первого начала термодинамики положило конец многочисленным, но бесплодным попыткам построить вечный двигатель.

Справедливость первого закона термодинамики для биологии можно доказать, если живой организм изолировать от окружающей среды, измерить количество выделенного им тепла и сравнить эту величину с тепловым эффектом биохимических реакций внутри организма. С этой целью еще в 1780 г. Лавуазье и Лаплас помещали морскую свинку в калориметр и измеряли количество выделенного тепла и углекислого газа. После этого определяли количе-

ство тепла, выделяющегося при прямом сжигании исходных продуктов питания. В обоих случаях получались близкие величины. Более точные результаты были получены при измерении количеств тепла, углекислоты, азота и мочевины, выделенных человеком. На основании этих данных вычисляли баланс обмена белков, жиров и углеводов. И здесь совпадение оказалось достаточно хорошим.

§ 18. Работа при изменении объема газа. Адиабатические процессы

Представим себе газ, расширяющийся в цилиндре под поршнем от объема V_1 при давлении p_1 до объема V_2 при давлении p_2 (рис. 27).

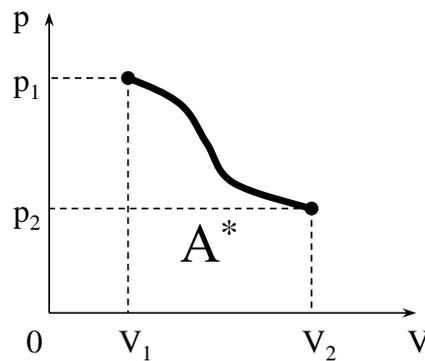


Рис. 27

По аналогии с механикой, полная работа A^* , совершаемая при изменении объема газа, численно равна площади криволинейной трапеции. В математическом выражении

$$A^* = \int_{V_1}^{V_2} p dV .$$

Пользуясь последним выражением, рассчитаем работу, совершаемую при *изотермическом* изменении объема одного моля идеального газа. Согласно закону Менделеева — Клапейрона

$$p = \frac{RT}{V} .$$

Тогда

$$A^* = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V} dV = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT (\ln V_2 - \ln V_1) = RT \ln \frac{V_2}{V_1} .$$

Еще проще рассчитывается работа *изобарического* изменения объема газа:

$$A^* = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) .$$

Кроме изобарического и изотермического процессов изменения объема газа существует так называемый *адиабатический процесс*. Адиабатическими называются процессы, происходящие при отсутствии теплообмена между системой и окружающей средой. В этом случае $dQ = 0$ и формула первого начала термодинамики принимает вид

$$dA^* = -dU .$$

Знак минус показывает, что при адиабатическом расширении внутренняя энергия системы уменьшается: система совершает работу за счет своей внутренней энергии. В случае адиабатического сжатия внутренняя энергия системы увеличивается за счет работы, совершаемой внешними силами. Поэтому dU будет положительно, но зато dA примет отрицательное значение и равенство остается справедливым.

Адиабатические процессы в идеальном газе описывает закон Пуассона:

$$TV^{\frac{c_p}{c_v}-1} = const,$$

где $c_v = (i/2)R$ — молярная теплоемкость при постоянном объеме — количество теплоты, необходимое для нагревания моля газа на 1 К при постоянном объеме; $c_p = c_v + R$ — молярная теплоемкость при постоянном давлении — количество теплоты, необходимое для нагревания моля газа на 1 К при постоянном давлении.

Из закона Пуассона следует, что при адиабатическом расширении газа его температура понижается, а при сжатии — повышается. Для осуществления адиабатических процессов необходима абсолютная теплоизоляция системы от окружающей среды. Наоборот, для осуществления изотермических процессов необходимо обеспечить абсолютную теплопроводность между системой и средой. Однако в природе нет ни абсолютных теплоизоляторов, ни абсолютных теплопроводников. Для практического осуществления процессов, близких к адиабатическим, возможны два пути: очень быстрое изменение объема газа и изменение объема очень большой массы газа. В обоих случаях не успевают произойти значительного теплообмена между газом и окружающей средой, что равносильно наличию хорошей теплоизоляции между ними.

Придадим формуле, отражающей закон Пуассона, несколько иной вид, вызвав температуру через давление согласно уравнению Менделеева — Клапейрона:

$$pV^{\frac{c_p}{c_v}} = const.$$

Пользуясь законами Пуассона и Бойля — Мариотта ($pV = const$), представим на графике адиабатический и изотермический процессы (рис. 28).

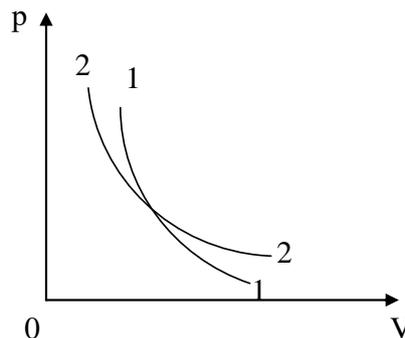


Рис. 28

Оказывается, что адиабата 1 идет круче изотермы 2. Это объясняется тем, что при изотермическом расширении давление газа уменьшается только за счет увеличения объема, тогда как при адиабатическом расширении оно уменьшается и за счет увеличения объема, и за счет понижения температуры.

Работа, совершаемая газом при адиабатическом процессе, пропорциональна изменению температуры газа:

$$A^* = -c_v(T_1 - T_2).$$

Образование облаков. Рассмотрим пример адиабатического процесса в природе — образование облаков. Поверхность Земли неоднородна, поэтому ее нагревание и нагревание прилегающего к ней слоя воздуха в различных местах оказывается неодинаковым. Воздух над участком поверхности, имеющим повышенную температуру по сравнению с соседними участками, в результате нагревания при постоянном давлении расширяется. Понижение плотности воздуха при расширении приводит к тому, что он «всплывает» вверх, а его место занимает более плотный и холодный воздух.

Однако на этом процесс не останавливается. Подъем некоторого количества теплого воздуха в более высокие слои атмосферы сопровождается его дальнейшим расширением, так как по мере удаления от поверхности Земли атмосферное давление уменьшается. Расширение воздуха происходит адиабатно и поэтому сопровождается его охлаждением. Для сухого воздуха подъем на 100 м по вертикали приводит к его охлаждению на 1°C . Очевидно, что подъем

нагретого воздуха будет продолжаться до тех пор, пока его температура в результате адиабатного охлаждения не сравняется с температурой воздуха на достигнутой высоте.

Водяной пар, содержащийся в воздухе, при подъеме и охлаждении на некоторой высоте из ненасыщенного становится пересыщенным, при этом происходит конденсация пара и возникает облако, состоящее из мельчайших капель воды. Высота нижней границы облака определяется условием охлаждения поднимающегося воздуха до точки росы.

Конденсация водяного пара в облаке сопровождается выделением тепла, поэтому воздух в облаке охлаждается менее интенсивно, чем вне него. Процесс дальнейшего его расширения и подъема продолжается. Облака могут иметь протяженность по вертикали свыше 10 км. Их вершины даже в самый жаркий летний день находятся в слоях воздуха с температурой ниже 0°C и состоят не из водяных капель, а из кристаллов льда.

Выяснив механизм образования облаков, поставим вопрос: почему они не падают на Землю? Ответить на него не сложно. Как показали экспериментальные исследования структуры облаков, размеры водяных капель в них лежат в пределах от 2 до 70 мкм. Капли таких малых размеров падают в воздухе с очень малой скоростью. Например, скорость падения капли радиусом 10 мкм составляет всего 1 см/с. Эффект уменьшения скорости падения капли с убыванием ее радиуса объясняется тем, что сила тяжести, действующая на каплю, пропорциональна ее объему, т.е. кубу радиуса: $F_m \sim V \sim r^3$, а сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости движения капли и площади ее поперечного сечения, т.е. квадрату ее радиуса: $F_c \sim vS \sim vr^2$.

С уменьшением радиуса капли сила тяжести убывает быстрее, чем сила сопротивления воздуха, и эти силы уравниваются при все меньших скоростях движения.

Если процесс конденсации пара в облаке идет более интенсивно, чем процесс испарения капель воды на поверхности облака, развитие облака может завершиться выпадением из него дождя, снега или града. По мере подъема вверх восходящим воздушным потоком водяные капли в результате конденсации пара увеличиваются в размерах. Этот процесс продолжается до тех пор, пока размер капли не станет таким, что скорость ее падения превысит скорость подъема восходящего потока воздуха в облаке. Капли, падающие вниз, встречают на своем пути более мелкие капли, поднимающиеся вверх, сливаются с ними, укрупняются. Процесс продолжается до тех пор, пока капли не выпадут из облака в виде дождя.

Особенно эффективно происходит образование осадков, если вершина облака состоит из кристалликов льда. При достижении критических размеров кристаллики льда начинают падать. Процесс конденсации пара на их поверхности в нижних слоях облака протекает гораздо интенсивнее, чем на поверхности капель. В результате из облака выпадает снег, а в некоторых случаях град.

Облака есть и на всех других планетах с мощными атмосферами. Ими полностью окружена поверхность Венеры. А поверхности Юпитера и Сатурна исчисляются от верхнего края облаков, поскольку никакой другой твердой или жидкой поверхности у них нет. Разнообразен химический состав облаков других планет (например, некоторые облака Венеры — это капельки серной кислоты), но механизмы их образования сходны с земными. Только надо иметь в виду, что образование облаков может вызывать не только конденсация капелек и кристаллов, но и химическая реакция. Лабораторный пример такой возможности — образование облачка из кристалликов хлористого аммония над поставленными рядом сосудами с соляной кислотой и нашатырным спиртом (раствором аммиака).

§ 19. Цикл Карно. Второе начало термодинамики

Математическое выражение второго начала термодинамики можно получить из рассмотрения так называемого *цикла Карно*, с которым мы познакомимся, введя предварительно понятие о *круговом процессе*.

Круговым процессом, или *циклом*, называется процесс, в результате которого система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное. На графике круговой процесс изображается *замкнутой* кривой линией (рис. 29). Работа A^* , совершаемая при круговом процессе, численно равна площади, ограниченной этой замкнутой линией.

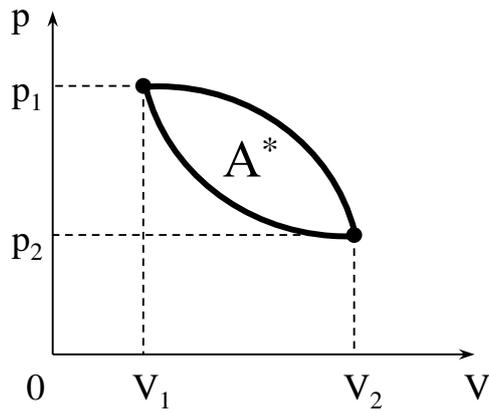


Рис. 29

Если в результате цикла совершается некоторая работа A^* , то система, периодически повторяющая такой цикл, называется *машиной*. В 1824 г. французский инженер Сади Карно теоретически рассмотрел работу *идеальной тепловой машины*, состоящей из одного моля идеального газа (рабочее тело), заключенного в цилиндр под поршнем, нагревателя и холодильника. Эта система периодически совершает обратимые циклы, состоящие из двух изотермических ($1 \rightarrow 2$ и $3 \rightarrow 4$) и двух адиабатических ($2 \rightarrow 3$ и $4 \rightarrow 1$) процессов (рис. 30).

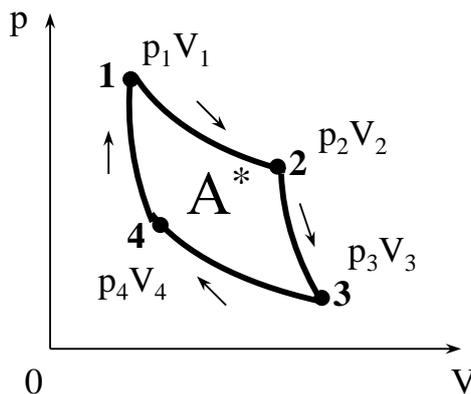


Рис. 30

Стенки цилиндра и поршень абсолютно нетеплопроводны, а дно цилиндра абсолютно теплопроводно. Однако с помощью абсолютно нетеплопроводной крышки, прикладываемой ко дну цилиндра, можно было сделать весь цилиндр абсолютно нетеплопроводным. Трение и тепловые потери в системе полностью отсутствуют.

Проследим за работой этой идеальной тепловой машины, получившей название *цикла Карно*.

1. Газ находится в сжатом состоянии 1 (p_1, V_1, T_1). Чтобы обеспечить изотермическое расширение газа, приведем дно цилиндра в тепловой контакт с нагревателем, находящимся при температуре T_1 .

2. Когда газ расширится до состояния 2 (p_2, V_2, T_1), уберем нагреватель и, закрыв дно крышкой, предоставим газу возможность закончить расширение адиабатически до состояния 3 (p_3, V_3, T_2). Совершая работу по расширению, газ охладится, поэтому $T_1 > T_2$.

3. Чтобы завершить цикл, т.е. вернуть газ в начальное состояние 1, а поршень — в исходное положение, необходимо совершить внешнюю работу сжатия газа. Будем сначала сжимать газ изотермически до состояния 4 (p_4, V_4, T_2), заменив крышку холодильником (при температуре T_2). Причем состояние 4 надо выбрать заранее с таким расчетом, чтобы из него по адиабате $4 \rightarrow 1$ можно было перевести газ в начальное состояние 1.

4. Завершим сжатие газа до начального состояния 1 (p_1, V_1, T_1) адиабатически, заменив холодильник крышкой.

На участке $1 \rightarrow 2$ газ совершил работу A^*_1 по изотермическому расширению, получив от нагревателя количество теплоты $Q_1 = A^*_1$. На участке $2 \rightarrow 3$ газ совершил работу A^*_2 по адиабатическому расширению за счет своей внутренней энергии. На участке $3 \rightarrow 4$ внешние силы совершили работу A_1 по изотермическому сжатию газа; при этом он отдал холодильнику количество теплоты $Q_2 = A_1$. Наконец, на участке $4 \rightarrow 1$ внешние силы совершили работу A_2 по адиабатическому сжатию газа, повысив его внутреннюю энергию.

Так как газ вернулся в первоначальное состояние, то изменение его внутренней энергии $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому началу термодинамики, полученное газом в результате всего цикла количество теплоты должно равняться совершенной им за время цикла работе:

$$Q_1 - Q_2 = A^*_1 + A^*_2 - A_1 - A_2 .$$

Очевидно, что по абсолютной величине $|A^*_2| = |A_2|$. Поэтому

$$Q_1 - Q_2 = A^*_1 - A_1 = A^* ,$$

где A^* — суммарная работа, совершаемая за весь цикл и численно равная площади, ограниченной графиком цикла. В результате цикла газ, получив количество теплоты Q_1 от нагревателя и передав часть этого количества теплоты Q_2 холодильнику, совершил внешнюю работу, равную

$$A^* = Q_1 - Q_2 .$$

Интересен вопрос: может ли рассматриваемая тепловая машина совершать работу только за счет получения количества теплоты от нагревателя, не отдавая части количества теплоты холодильнику? При отсутствии холодильника процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ можно было бы замкнуть (получить цикл) только посредством обратного процесса $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. Площадь такого цикла, а следовательно, и совершаемая работа будут равны нулю. Таким образом, отдача части теплоты холодильнику является необходимым условием совершения работы, т.е. рассматриваемая тепловая машина не может все полученное количество теплоты целиком переводить в работу. Как показывают опыт и выводы из всей термодинамики, это невозможно не только для данной машины, но и вообще.

Невозможен механизм, который все получаемое от нагревателя количество теплоты целиком переводил бы в работу; часть этого количества теплоты должна быть отдана холодильнику. Это утверждение является одной из формулировок *второго начала термодинамики*.

Таким образом, тепловая машина должна работать по схеме, представленной на рисунке 31.

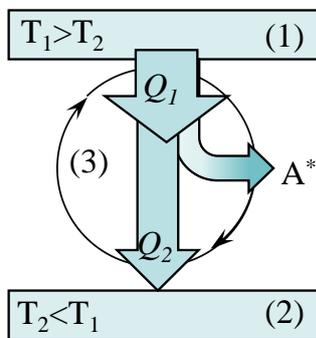


Рис. 31

Воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу, называется *вечным двигателем второго рода*. Если бы такой механизм можно было реализовать, то его осуществление дало бы человечеству неисчерпаемый источник энергии, поскольку запасы теплоты на Земле практически неограниченны. За счет одного только количества теплоты, содержащегося в воде морей и океанов, можно было бы с помощью вечного двигателя второго рода приводить в движение машины всех фабрик и заводов в течение многих тысячелетий. Причем за первые 1700 лет такой «перекачки» теплоты температура воды в океане понизилась бы в среднем только на одну сотую долю кельвина.

Однако вечный двигатель второго рода противоречит второму началу термодинамики. Поэтому второе начало можно еще сформулировать так: *вечный двигатель второго рода невозможен*.

Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, равный отношению полезной работы к совершенной, определяется выражением

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} ,$$

т.е. меньше единицы. Понятно, что реальные тепловые машины благодаря трению и неизбежным тепловым потерям имеют значительно меньший коэффициент полезного действия (поршневая паровая машина до 20%, паровая турбина — до 30%, двигатель внутреннего сгорания — до 45%).

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Сформулируйте первый закон термодинамики. Следствием какого закона является первый закон термодинамики?
2. Как связано переданное телу количество теплоты с изменением внутренней энергии тела при изохорном процессе?
3. Изменяется ли внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе, когда давление увеличивается?
4. Какой процесс называют адиабатным? Расскажите об адиабатном процессе в природе — образовании облаков. Знакомы ли Вы с технологиями «разгона» облаков? Перечислите физические явления, которые лежат в основе «разгона». Предлагаем при ответе опираться на материал видеоролика «Галилео. Разгон облаков» (<http://www.youtube.com/watch?v=y9Gz9LNcYF0>).
5. Превращается ли при работе теплового двигателя внутренняя энергия одного вида во внутреннюю энергию другого вида? Обоснуйте свой ответ.
6. Зачем нужны нагреватель и холодильник при работе теплового двигателя?
7. Используя интернет-ресурсы, подготовьте ответы на вопросы. Чем отличается действие бытового холодильника от действия теплового двигателя и что у них общего? Каков принцип работы кондиционера? Что общего у кондиционера с холодильником и чем они отличаются?
8. Связана ли необратимость процессов с законом сохранения энергии? Проиллюстрируйте свой ответ примерами. Сформулируйте второй закон термодинамики.
9. Почему существование энергетического кризиса не противоречит закону сохранения энергии?
10. Подготовьте сообщение на тему «Отрицательное влияние тепловых машин на окружающую среду». Обратите внимание на направления деятельности по уменьшению негативных последствий работы тепловых двигателей.

§ 20. Электрические заряды. Взаимодействие зарядов

Все тела живой и неживой природы построены из атомов, в состав которых входят заряженные частицы — электроны и протоны. Протоны вместе с нейтронами образуют положительно заряженное атомное ядро, удерживающее при себе оболочку из несущих отрицательный заряд электронов, *обращающихся* вокруг ядра. Электрические силы взаимодействия связывают ядро и электронную оболочку в единую систему — электрически нейтральный атом. Вследствие внешних воздействий некоторые атомы, входящие в состав тела, могут потерять по одному-два электрона, слабее других связанных с ядром, и превращаются в положительные ионы, а тело в целом приобретает положительный заряд. Накопление избыточного заряда в теле называется его *электризацией*. Тело электризуется положительно, если его атомы теряют электроны, и отрицательно, если тело принимает избыточные электроны извне.

Заряд тела может иметь значения, кратные заряду e электрона, называемому *элементарным зарядом*. Понятие *точечные заряды* обозначает заряженные тела или частицы, размеры которых малы в сравнении с интересующими нас расстояниями.

Опыт показывает, что *в изолированной системе тел полный заряд сохраняется постоянным* независимо от того, какие процессы происходят в этой системе. Это фундаментальное положение называется *законом сохранения заряда*. Из опыта получено следующее значение элементарного заряда: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов изучает *электростатика*. Основным законом электростатики был экспериментально установлен французским физиком Ш. Кулоном в 1785 г. В опытах Кулона измерялись силы взаимодействия заряженных шаров. На тонкой проволоке была подвешена стеклянная палочка с двумя металлическими шарами на концах. Одному из них сообщался электрический заряд, против него устанавливался другой заряженный шар (рис. 32).

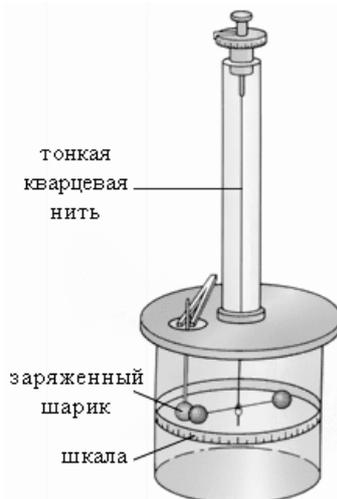


Рис. 32

Сила взаимодействия заряженных шаров определялась по углу поворота стеклянной палочки, закручивающей нить подвеса. Расстояние между центрами шаров нетрудно было измерить.

Хотя Кулон проводил опыты с шарами конечных размеров, и точность эксперимента была невелика, ему удалось точно сформулировать основной закон электростатики: модуль силы взаимодействия двух точечных покоящихся зарядов q_1 и q_2 прямо пропорционален произведению их модулей и обратно пропорционален квадрату расстояния r между ними:

$$|F| = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — электрическая постоянная, зависящая от выбора системы единиц, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся взаимодействующие заряды (для вакуума $\epsilon = 1$).

Силы взаимодействия между точечными зарядами направлены вдоль прямой, соединяющей заряды (центральные силы). Для разноименных зарядов это силы притяжения, а для одноименных — силы отталкивания (рис. 33).

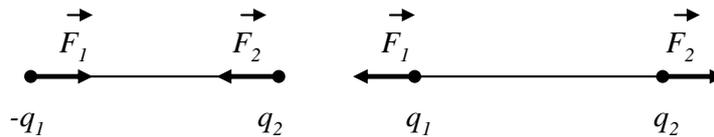


Рис. 33

Кулоновские силы относятся к классу электромагнитных взаимодействий. Между движущимися зарядами существует также магнитное взаимодействие, которое тем более значительно, чем ближе скорость движения к скорости света c . Модуль заряда от скорости его движения не зависит.

При взаимодействии электронов и ядер в атомах основную роль играют именно кулоновские силы. Магнитное взаимодействие существенной роли в атоме не играет. А действие гравитационных сил в атомных системах вообще не учитывается, так как они в 10^{42} раз слабее кулоновских.

§ 21. Электрическое поле. Напряженность электрического поля

Силовое взаимодействие между любыми телами не может происходить без участия материи. Заряженные частицы и тела, находясь на расстоянии, взаимодействуют друг с другом посредством их электрических полей, которые представляют собой один из видов материи, существующей наряду с веществом. Поле неподвижных зарядов называется *электростатическим*.

Электрическое поле проявляет себя по силовому действию на заряды, например на положительный пробный заряд q (настолько малый, чтобы он не вызывал перераспределения зарядов в окружающих телах).

Силовой характеристикой поля является *напряженность* \vec{E} — векторная величина, равная отношению силы, действующей со стороны поля на помещенный в данную точку пробный заряд, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Напряженность электрического поля выражается в *ньютон на кулон (Н/Кл)*. Следовательно, на заряд q , находящийся в точке поля с напряженностью \vec{E} , действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Векторы \vec{E} и \vec{F} совпадают по направлению при $q > 0$ и противоположны по направлению, если $q < 0$. Поле называется *однородным*, если напряженность поля во всех точках одинакова по модулю и направлению.

Выражение для модуля напряженности поля точечного заряда следует из закона Кулона и имеет вид:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}.$$

Напряженность поля \vec{E} , создаваемого системой зарядов q_1, q_2, q_3, \dots , на основе принципа независимости действия сил можно найти как векторную сумму напряженностей полей этих зарядов:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Это положение называется *принципом суперпозиции* и используется для расчета полей.

Электрическое поле принято изображать графически с помощью *линий напряженности*, т.е. линий, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора \vec{E} . Число линий напряженности, пронизывающих воображаемую единичную площадку, перпендикулярную этим линиям, выбирается равным модулю напряженности в данной точке. Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах, нигде не замыкаются и не пересекаются.

§ 22. Работа сил электростатического поля. Потенциал

Рассчитаем работу, совершаемую полем положительного точечного заряда q (рис. 34) по перемещению положительного пробного заряда q_0 из точки 1 в точку 2.

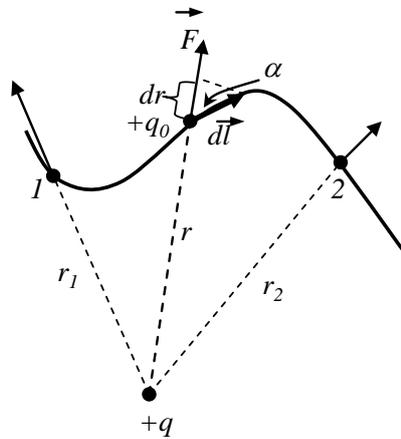


Рис. 34

В процессе его движения сила взаимодействия

$$F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$$

зарядов q и q_0 будет меняться. Сначала определим элементарную работу на малом участке пути dl , на котором эту силу можно считать постоянной:

$$dA = Fdl \cos \alpha,$$

где α — угол между перемещением $d\vec{l}$ и силой \vec{F} . Учитывая, что $dl \cos \alpha = dr$, найдем полную работу суммированием элементарных работ на всем пути 1→2:

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} dr = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2}.$$

Отсюда видно, что работа кулоновских сил определяется только начальным и конечным положениями пробного заряда q_0 (не зависит от формы траектории). Это означает, что *электростатическое поле является потенциальным, а кулоновские силы — консервативными*.

Работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии:

$$A_{12} = -\Delta W_p.$$

Сопоставляя два последних выражения, получим формулу для потенциальной энергии заряда q_0 , находящегося в поле заряда q :

$$W_p = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} + c.$$

Если принять в бесконечности $W_p = 0$, то постоянная c будет равна нулю. Тогда

$$W_p = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Отношение $\frac{W_p}{q_0} = \varphi$ не зависит от значения пробного заряда q_0 и является энергетической характеристикой поля, называемой *потенциалом*.

Потенциал — скалярная физическая величина, характеризующая способность поля совершать работу и измеряемая отношением потенциальной энергии пробного точечного заряда, помещенного в данную точку поля, к значению этого заряда. Можно также сказать, что потенциал данной точки поля равен работе, совершаемой полем при перемещении единичного положительного заряда из этой точки поля в бесконечность:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0} = \frac{A}{q_0}.$$

Потенциал поля точечного заряда q выражается формулой

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Если заряд q_0 перемещается из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , то силы поля совершают работу

$$A_{12} = -\Delta W_p = q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

равную произведению заряда на разность потенциалов.

Знак потенциала определяется знаком заряда, создающего поле. Если поле образовано системой зарядов, то потенциал φ равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$\varphi = \sum_1^N \varphi_i.$$

Точки пространства, в которых потенциал имеет одно и то же значение, образуют поверхность, называемую *эквипотенциальной*. Перемещение заряда вдоль этой поверхности не сопровождается работой ($\varphi = const, d\varphi = 0$). Это означает, что силы электрического поля, а следовательно, и *линии напряженности перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям*.

За единицу потенциала принят *вольт (В)*:

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}.$$

Потенциальные кривые на рисунке 35 выражают зависимость потенциальной энергии двух точечных зарядов от расстояния между ними (для одноименных зарядов $W_p > 0$ и для разноименных $W_p < 0$).

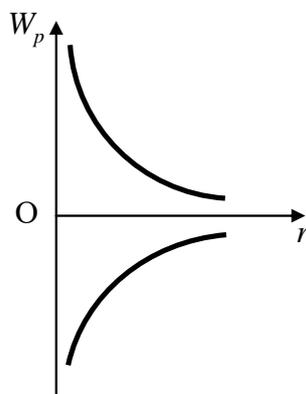


Рис. 35

Так как обе потенциальные кривые не имеют минимума (потенциальной ямы), то система из двух неподвижных зарядов не может находиться в устойчивом равновесии: под действием кулоновских сил одноименные заряды расходятся на бесконечно большое расстояние, а разноименные — сближаются до слияния и нейтрализации. Это утверждение оказывается справедливым для любого числа зарядов при любом их расположении: *всякая конфигурация покоящихся электрических зарядов неустойчива, если между ними действуют только кулоновские силы.*

Это положение называется *теоремой Ирншоу*. Из нее, в частности, следует, что модель атома как система, состоящая из электрических зарядов, не может быть статической. Непрерывное движение электронов в атомах, колебания ядер в молекулах, ионов в кристаллах — необходимое условие устойчивости этих систем. Исследования показывают, что эти движения не прекращаются даже при абсолютном нуле температуры.

Таким образом, электрическое поле характеризуется двумя физическими величинами: напряженностью (силовая характеристика) и потенциалом (энергетическая характеристика); выясним как они связаны между собой. Пусть положительный заряд q перемещается силой электрического поля с эквипотенциальной поверхности, имеющей потенциал φ_0 , на близко расположенную эквипотенциальную поверхность, имеющую потенциал $\varphi_n < \varphi_0$ (рис. 36).

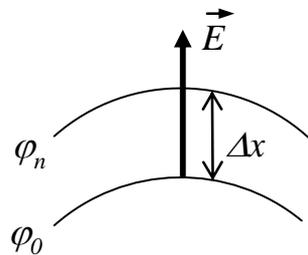


Рис. 36

Напряженность поля на всем малом пути Δx можно считать постоянной. Тогда работа перемещения

$$\Delta A = qE\Delta x.$$

С другой стороны,

$$\Delta A = q(\varphi_0 - \varphi_n) = -q\Delta\varphi.$$

Сопоставляя две последних формулы, получим

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = -\text{grad}\varphi;$$

знак минус обусловлен тем, что напряженность поля направлена в сторону убывания потенциала, тогда как градиент потенциала направлен в сторону возрастания потенциала.

Итак, *напряженность поля равна по величине и противоположна по направлению градиенту потенциала.* Это показывает, что единицей измерения напряженности электрического поля является 1 В/м .

§ 23. Теорема Остроградского — Гаусса

Число силовых линий, пронизывающих некоторую поверхность (реальную или воображаемую), расположенную в электрическом поле, называется *потокотом напряженности электрического поля* N через эту поверхность.

Определим поток напряженности поля электрических зарядов $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ через некоторую замкнутую поверхность, окружающую эти заряды. Причем будем считать поток отрицательным, если он направлен внутрь поверхности; в противном случае будем считать его положительным.

Рассмотрим сначала случай *сферической* поверхности радиусом R , окружающей *один* заряд q , находящийся в ее центре (рис. 37).

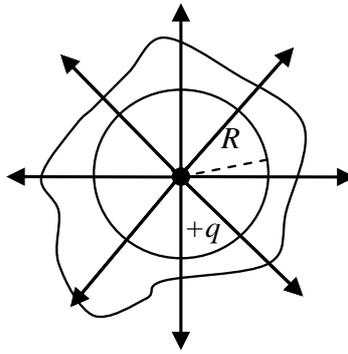


Рис. 37

Мы знаем, что напряженность поля в каждой точке сферы одинакова и равна

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Силовые линии направлены по радиусам, т.е. перпендикулярно поверхности сферы. Это дает возможность применить для расчета потока напряженности формулу:

$$N = ES = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где $S = 4\pi R^2$ — площадь сферической поверхности.

Окружим теперь сферу произвольной замкнутой поверхностью. Как видно из рисунка 37, каждая силовая линия, пронизывающая сферу, пронизет и эту поверхность. Следовательно, для любой замкнутой поверхности справедлива формула

$$N = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

Теперь вернемся к общему случаю произвольной поверхности, окружающей n зарядов. Очевидно, что поток напряженности через эту поверхность равен сумме потоков, создаваемых каждым из зарядов:

$$N = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

Таким образом, *поток напряженности, пронизывающий любую замкнутую поверхность, окружающую электрические заряды, пропорционален алгебраической сумме окруженных зарядов.* Это положение называется *теоремой Остроградского — Гаусса.*

Теорема Остроградского — Гаусса представляет значительный практический интерес: с ее помощью можно очень просто определить напряженность полей, создаваемых заряженными телами различной формы. В качестве примера определим напряженность поля *равномерно заряженной бесконечной плоскости.* Силовые линии поля в этом случае перпендикулярны плоскости.

Определим величину напряженности поля плоскости в некоторой точке A (рис. 38). Пусть поверхностная плотность заряда плоскости (т.е. заряд, приходящийся на единицу площади) равна σ (Кл/м²). Построим воображаемый цилиндр, ось которого перпендикулярна плоскости, а левое основание содержит точку A . Плоскость делит цилиндр пополам.

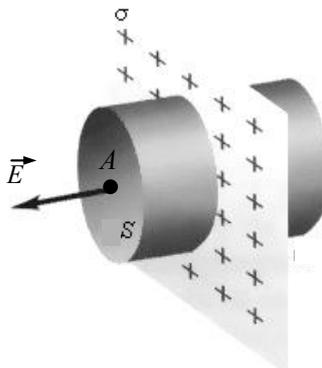


Рис. 38

Согласно теореме Остроградского — Гаусса, поток напряженности через поверхность этого цилиндра

$$N = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_1^n q_i = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0},$$

где $\sum_1^n q_i = \sigma S$ — заряд части плоскости, окруженный цилиндром, S — площадь основания

цилиндра. Весь поток проходит только через основания цилиндра, так как силовые линии параллельны боковой поверхности цилиндра. На обоих основаниях напряженность поля одинакова, так как они симметричны относительно плоскости. Тогда

$$N = E2S,$$

где $2S$ — площадь оснований цилиндра. Приравнявая друг к другу правые части двух последних формул, получим

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}.$$

Таким образом, напряженность поля бесконечной заряженной плоскости пропорциональна поверхностной плотности заряда и *не зависит от расстояния до плоскости*. Следовательно, поле плоскости является *однородным*.

§ 24. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Поместим в однородное электрическое поле нейтральный металлический проводник. Под влиянием поля свободные электроны проводника начнут перемещаться против поля. В результате левая часть поверхности проводника зарядится отрицательно, а правая, на которой окажется недостаток электронов, — положительно (рис. 39).

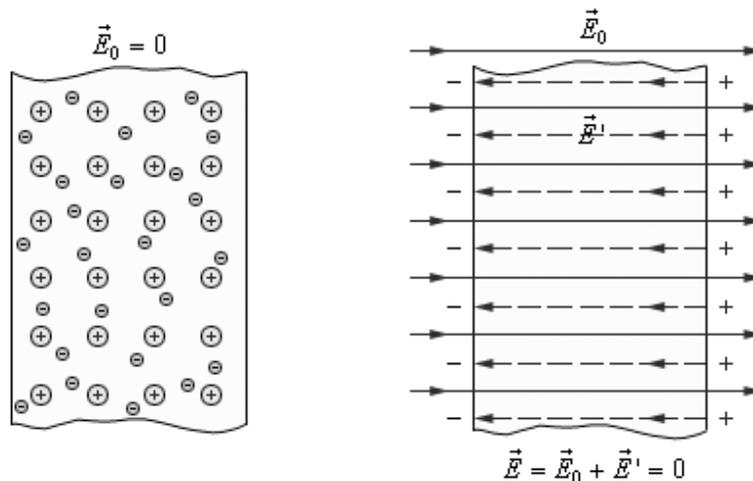


Рис. 39

Это явление называется *электростатической индукцией*. Индуцированные заряды создают внутри проводника свое собственное поле, которое, очевидно, будет направлено противоположно внешнему полю, первоначально пронизывающему проводник. Перераспределение зарядов в проводнике происходит до тех пор, пока внешнее поле внутри него не скомпенсируется собственным полем зарядов. При этом результирующее поле внутри проводника отсутствует, напряженность становится равной нулю, перераспределение зарядов прекращается. Отсутствие поля внутри проводника означает, что все его точки имеют одинаковый потенциал, т.е. проводник является эквипотенциальным телом и поверхность проводника служит эквипотенциальной поверхностью.

Очевидно, что электрическое поле будет отсутствовать не только внутри сплошного проводника, но и внутри полостей, имеющих в проводнике, например, внутри полого шара. На этом свойстве проводников основана так называемая электростатическая защита: прибор, ко-

торый надо защитить от действия внешнего электрического поля, окружают со всех сторон проводником, например густой металлической сеткой.

Если проводник заряжен, то сообщенные ему заряды будут удаляться друг от друга под действием кулоновских сил отталкивания на возможно большее расстояние. Поэтому электрические заряды располагаются только на внешней поверхности проводника. Внутри проводника свободных зарядов нет. Наибольшая поверхностная плотность заряда оказывается на выпуклых частях проводника: ребрах, остриях и т.п. Вблизи этих частей создается наибольшая напряженность поля заряженного проводника.

Опыт показывает, что помещенный в электрическое поле диэлектрик приобретает полярность: та часть его поверхности, в которую входят силовые линии, заряжается отрицательно, а противоположная часть — положительно. Это явление называется *поляризацией диэлектрика*. По внешнему проявлению процесс поляризации диэлектрика схож с рассмотренным ранее процессом электростатической индукции проводника. Однако по существу эти процессы различны. В диэлектрике нет свободных зарядов, которые могли бы перераспределяться под действием поля. Все разноименные заряды в диэлектрике попарно связаны (электронная оболочка атома связана с его ядром, отрицательные ионы кристалла связаны с его положительными ионами и т.п.).

Диэлектрики делятся на состоящие из неполярных молекул (центры распределения «+» и «-» в молекуле совпадают) и состоящие из полярных молекул (центры распределения «+» и «-» в молекуле смещены). Неполярными являются все ковалентные двухатомные молекулы (H_2 , O_2 , N_2 и др.) и многоатомные молекулы, имеющие центр симметрии (CCl_4 , CO_2 , C_6H_6 и др.). Изолированные атомы также, конечно, неполярны. К полярным диэлектрикам относятся, например, вода, аммиак, эфир, ацетон.

Под влиянием внешнего электрического поля на молекулы неполярного диэлектрика их положительный заряд сместится в направлении поля, а электронная оболочка вытянется в противоположную сторону. Молекулы станут полярными и расположатся цепочками вдоль силовых линий поля (рис. 40).

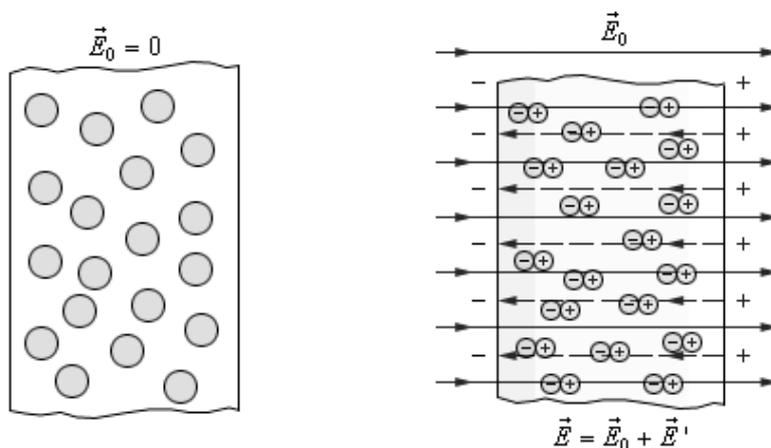


Рис. 40

В результате торцы диэлектрика приобретут разноименные заряды — диэлектрик поляризуется. Степень электронной поляризации диэлектрика зависит от его свойств и от величины напряженности поля E_0 .

Благодаря тепловому движению полярные молекулы расположены в диэлектрике беспорядочно, поэтому диэлектрик в целом оказывается неполяризованным (рис. 41). Под влиянием электрического поля все молекулы диэлектрика повернутся так, что их оси расположатся приблизительно вдоль силовых линий поля. В результате диэлектрик поляризуется. Полной ориентации молекул препятствует тепловое движение. Степень поляризации в этом случае зависит от свойств диэлектрика, величины напряженности поля E_0 и температуры.

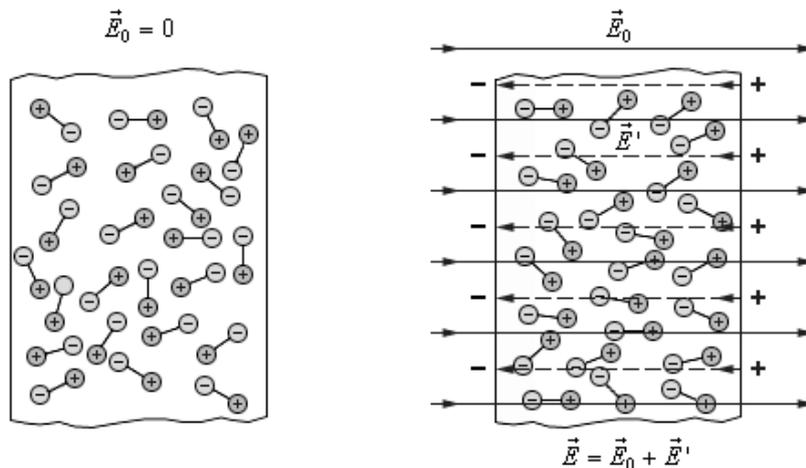


Рис. 41

Поляризация диэлектрика в электрическом поле ведет к ослаблению этого поля внутри диэлектрика. Отношение напряженности поля в вакууме к напряженности поля в однородной изотропной диэлектрической среде при неизменных зарядах, создающих поле, называется *относительной диэлектрической проницаемостью* ϵ этой среды (или просто *диэлектрической проницаемостью*):

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Очевидно, что ϵ — величина безразмерная. Относительная диэлектрическая проницаемость количественно характеризует свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле. Численные ее значения для различных диэлектриков приводятся в справочных таблицах.

§ 25. Емкость. Энергия электрического поля

Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, то заряженный проводник можно характеризовать потенциалом. Если уединенному проводнику сообщить заряды $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$, то он будет иметь потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ соответственно. Опыт показывает, что для каждого проводника отношение $\frac{q_1}{\varphi_1} = \frac{q_2}{\varphi_2} = \frac{q_3}{\varphi_3} = \dots = \frac{q_n}{\varphi_n}$ есть величина постоянная; эта величина называется *емкостью проводника* и обозначается через c :

$$c = \frac{q}{\varphi}.$$

Единица емкости — *фарад* (Φ): $1 \Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

Емкость проводника определяется его размерами, формой, диэлектрической проницаемостью окружающей среды и, кроме того, зависит от присутствия и расположения окружающих тел, влияющих на конфигурацию поля и, следовательно, на потенциал рассматриваемого заряженного проводника.

Система двух близко расположенных проводников, разделенных слоем диэлектрика, называется *конденсатором*. Емкость конденсатора определяется формулой

$$c = \frac{q}{U},$$

где U — разность потенциалов между проводниками (обкладками конденсатора), несущими заряды $+q, -q$. Так как электрическое поле конденсатора сосредоточено между его обкладками (рис. 42, а), то наружные тела не влияют на него и, следовательно, не изменяют емкость конденсатора.

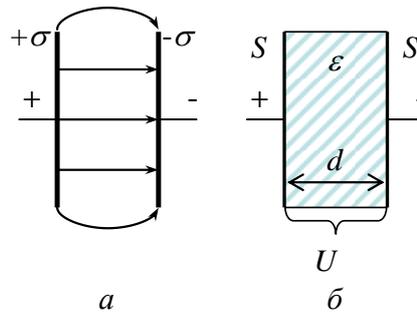


Рис. 42

На рисунке 42, б показан плоский конденсатор (S — площадь каждой пластины, d — расстояние между ними, σ — поверхностная плотность заряда на пластинах и ε — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами). Если расстояние между пластинами мало в сравнении с размерами пластин, то поле между ними можно считать однородным. Напряженность поля в этом случае определяется формулой

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Учитывая связь между разностью потенциалов и напряженностью, получаем:

$$U = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Тогда емкость плоского конденсатора ($q = \sigma S$):

$$c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

В заряженном конденсаторе накапливается электрическая энергия. Она измеряется работой, совершаемой при его зарядке. Представим себе, что зарядка происходит путем последовательного переноса малых порций заряда с одной обкладки на другую. Если q и u — мгновенные значения заряда и разности потенциалов, то при переносе очередной порции заряда dq совершается работа $dA = u dq = (q/c) dq$. Полная работа, затраченная на зарядку, равна энергии конденсатора $W_{эл}$:

$$W_{эл} = A = \int_0^q \frac{1}{c} q dq = \frac{q^2}{2c} = \frac{qU}{2} = \frac{cU^2}{2}.$$

Выразим энергию плоского конденсатора через напряженность электрического поля между обкладками:

$$W_{эл} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V.$$

Здесь V — объем поля.

Величина $w_{эл} = \frac{W_{эл}}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$ называется *объемной плотностью энергии* электрического поля. Эта формула справедлива также для неоднородного и нестационарного полей. Электрическое поле является материальным носителем энергии. В рамках электростатики это нельзя проверить, поскольку поле неразрывно связано с покоящимися зарядами и переноса энергии нет. Но электрическое поле может существовать и в отрыве от зарядов, будучи связано с переменным магнитным полем. Совокупность этих полей в виде электромагнитной волны распространяется в пространстве и переносит энергию (передача световых, теле-, радиосигналов).

§ 26. Биопотенциалы

Биологические жидкости, циркулирующие в телах животных и растений, содержат значительное число носителей заряда — положительных и отрицательных ионов. Процессы обмена, непрерывно происходящие в живом организме, приводят к перераспределению зарядов

в тканях и возникновению разностей потенциалов, названных *биопотенциалами*. Установлено, что все клетки животных и растительных организмов обладают тем или иным видом электрической активности.

Для клеток в состоянии покоя характерна определенная разность потенциалов порядка 60—100 мВ между внутренним содержимым клетки и наружной средой. Это объясняется тем, что оболочка клетки — биомембрана — избирательно пропускает одни ионы и задерживает другие, из-за чего концентрация ионов определенного вида по обе стороны мембраны оказывается различной. Образующийся двойной электрический слой создает в мембране сильное электрическое поле, которое в свою очередь оказывает влияние на ионообмен в клетках. Мембраны органелл клетки — митохондрий — выступают в роли конденсаторов — накопителей электрической энергии. Электроемкость мембран велика и в расчете на 1 см² поверхности составляет несколько мкФ.

При переходе ткани к активной деятельности проницаемость и электрическое состояние клеточных мембран резко меняются, в результате чего возникает электрический импульс, который распространяется по нервному волокну. Способность превращать все внешние воздействия в электрические — универсальное свойство живого организма.

Электрические процессы в отдельных клетках суммируются и обуславливают распределение зарядов в тканях и органах. Так, в работающей мышце постепенно увеличивается положительный заряд. Это приводит к повышенному снабжению ее кислородом, поскольку эритроциты артериальной крови имеют избыточный отрицательный заряд. Работа мышц, нервных клеток приводит к определенному распределению потенциала в работающем органе. Сердце, например, ведет себя как электрический диполь, момент которого периодически меняется, образуя переменное электрическое поле в организме (потенциалы можно регистрировать на поверхности тела — электрокардиограмма).

Некоторые виды рыб (электрический угорь, скат, сом) имеют специальный электрический орган, представляющий собой мелкопластинчатую структуру из чередующихся тонких слоев мышечной и соединительной ткани. Мышечная ткань служит проводником, соединительная — изолятором. Следовательно, с физической точки зрения, этот орган является батареей конденсаторов. К органу идут толстые нервные стволы от спинного мозга. Разность потенциалов, возникающая, например, в электрическом органе ската, достигает 300 В, а в органе электрического угря — 400—600 В. Электрические органы выполняют разные функции: нападение, внутривидовая сигнализация, локация.

Фотосинтез, происходящий в растениях под действием света, также сопровождается перераспределением заряда. Все жизненно важные процессы в живых организмах теснейшим образом связаны с электрическими эффектами. Этим объясняется тот факт, что внешние электрические поля могут в определенной степени влиять на эти процессы. Измерения показали, что земной шар заряжен отрицательно (заряд порядка 10⁵ Кл), а верхние слои атмосферы — положительно. Напряженность электрического поля у поверхности Земли в среднем составляет 130 В/м. Изменение околоземного поля в результате атмосферных явлений (циклоны, грозы и т.д.) приводит к перераспределению зарядов в биологических организмах и влияет на их состояние.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Какова роль электрических взаимодействий в строении атома и образовании молекул?
2. Проявляются ли электрические взаимодействия в механических явлениях?
3. Что общего у закона Кулона с законом всемирного тяготения и чем отличаются эти законы?
4. Познакомьтесь с биографией Ш. Кулона и его научными открытиями (https://www.youtube.com/watch?v=GQ8rNz_sQXs). На основе просмотренного фильма заполните таблицу.

Знаю	Узнал(а) из фильма	Интересно
Перечислите известные Вам факты биографии ученого и его достижения в области физики	Перечислите неизвестные Вам ранее факты биографии ученого и его достижения в области физики	Отметьте факты, которые для Вас являются интересными, неожиданными

5. Что такое напряженность электрического поля? Изобразите схематически вид линий напряженности для поля а) точечного заряда (положительного, отрицательного); б) равномерно заряженной сферы; в) равномерно заряженной плоскости; г) двух равномерно заряженных пластин с равными по модулю зарядами.

6. Чему равна разность потенциалов между двумя точками, расположенными на поверхности изолированного проводника? Ответ обоснуйте.

7. Как надо перемещать точечный заряд в поле заряженного шара, чтобы потенциальная энергия этого заряда не изменялась? Обязательно ли этот заряд должен двигаться по окружности?

8. Используя интернет-ресурсы, подберите наиболее удачный, на Ваш взгляд, опорный конспект по теме «Проводники и диэлектрики в электрическом поле». Какие изменения и дополнения Вы хотели бы в него внести?

9. Пластины плоского конденсатора раздвигают при неизменной разности потенциалов пластин. Как изменяется при этом заряд на пластинах? Как изменяется энергия конденсатора?

10. Составьте по теме «Биопотенциалы» вопросы, которые требуют от отвечающего развернутого ответа. Количество вопросов определите самостоятельно.

§ 27. Сила тока. Электродвижущая сила.
Напряжение

Электрическим током называется упорядоченное (т.е. происходящее в одном направлении) движение электрических зарядов. За направление тока принято считать направление движения положительных зарядов. Обычно электрический ток возникает под влиянием электрического поля.

Зарядим два проводника 1 и 2 разноименным электричеством до потенциалов φ_1 и φ_2 и соединим их третьим проводником 3 (рис. 43). Разность потенциалов, возникающая при этом на концах соединительного проводника, создает внутри него электрическое поле, направленное в сторону падения потенциала. Если в соединительном проводнике 3 носителями заряда являются электроны, то начнется их перемещение в направлении 231 , т.е. по проводнику пойдет ток в направлении 132 .

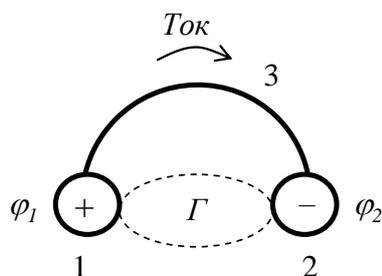


Рис. 43

Величина заряда Δq , проходящего за одну секунду через поперечное сечение проводника, называется *силой тока* I :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

где Δt — промежуток времени прохождения заряда Δq . Ток, сила и направление которого не изменяются со временем, называется *постоянным*; в противном случае ток называется *переменным*.

В СИ единица силы тока — *ампер* (A) — является основной, установленной на основе взаимодействия двух параллельных проводников с током. А по определению силы тока устанавливается единица заряда в СИ — *кулон* ($Kл$).

Возвращаясь к рисунку 43, заметим, что движение электронов по соединительному проводнику приведет к разрядке проводников 1 и 2 и ликвидации разности потенциалов между ними. В результате напряженность поля внутри проводника будет равна нулю и ток прекратится. Для поддержания постоянного тока необходимо иметь специальное устройство Γ , внутри которого все время происходило бы разделение разноименных зарядов и перенос положительных зарядов на проводник 1, а отрицательных — на проводник 2. Такое устройство называется *генератором*, или *источником тока*.

Очевидно, что силы, разделяющие заряды в генераторе, имеют неэлектрическую природу, так как электрические силы могут только соединять, но не разделять разноименные заряды. Поэтому силы, разделяющие заряды в источнике тока, называются *сторонними силами*. Природа сторонних сил может быть различной. В генераторе переменного тока эти силы возникают за счет энергии магнитного поля и механической энергии вращения якоря; в аккумуляторе и гальваническом элементе — за счет энергии химических реакций; в полупроводниковом фотоэлементе — за счет электромагнитной энергии (света) и т.п.

Итак, простейшая *электрическая цепь* постоянного тока должна состоять из соединительного проводника 3 и источника тока G , непрерывно заряжающего проводники 1 и 2 , называемые *полюсами* источника тока (рис. 43).

Разделению и переносу зарядов внутри источника тока препятствуют, во-первых, внутреннее электрическое поле, направленное от положительного полюса к отрицательному, и, во-вторых, сопротивление среды источника тока (например, вязкость электролита в аккумуляторе или в гальваническом элементе). Поэтому работа сторонней силы A складывается из работы A_1 , совершаемой против сил электрического поля внутри источника тока, и работы A^* , совершаемой против сил сопротивления среды этого источника:

$$A = A_1 + A^*.$$

Работа A_1 определяется выражением:

$$A_1 = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где q — арифметическая сумма зарядов (положительных и отрицательных), переносимых сторонней силой на полюсы источника тока вопреки действию электрического поля. Поэтому можно написать:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) + A^*.$$

Работа, совершаемая сторонней силой внутри источника при перемещении между его полюсами единичного заряда, называется *электродвижущей силой* источника тока (э.д.с.). Обозначив э.д.с. буквой ξ , получим

$$\xi = \frac{A}{q} \quad \text{или} \quad \xi = (\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{A^*}{q}.$$

Если полюсы источника тока разомкнуты (соединительный проводник 3 отсутствует), то $A^* = 0$, так как в этом случае сторонняя сила не перемещает зарядов внутри источника тока, а лишь поддерживает установившееся (на полюсах) разделение зарядов. Тогда

$$\xi = \varphi_1 - \varphi_2,$$

т.е. *электродвижущая сила равна разности потенциалов на полюсах разомкнутого источника тока*. Разность потенциалов на полюсах источника тока, замкнутого внешней электрической цепью, называется *напряжением* источника тока. Напряжение меньше э.д.с. на величину A^*/q . Таким образом, электродвижущая сила равна той максимально возможной разности потенциалов, которая устанавливается на полюсах данного источника тока, когда они разомкнуты. На любом участке внешней электрической цепи, т.е. между любыми двумя поперечными сечениями соединительного проводника 3 , существует некоторая разность потенциалов, она называется *напряжением*, или *падением напряжения*, на этом участке цепи.

§ 28. Закон Ома

1. Закон Ома для однородного участка цепи. Участки электрической цепи, на которых электрический ток создается только электростатическим (стационарным) полем, называются *однородными*. В 1826 г. немецкий физик Г. Ом обнаружил, что сила тока на однородном участке прямо пропорциональна разности потенциалов на участке:

$$I \sim \varphi_1 - \varphi_2.$$

Другими словами, отношение разности потенциалов между концами проводника, являющегося однородным участком электрической цепи, к силе тока в цепи есть величина постоянная:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{I} = R = \text{const}.$$

Эта величина называется *электрическим сопротивлением проводника*. Единицей электрического сопротивления в СИ является ом:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

Согласно экспериментальным исследованиям Ома, сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где коэффициент пропорциональности ρ , характеризующий материал, из которого изготовлен проводник, называется *удельным сопротивлением* проводника. Из последней формулы следует соотношение

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Следовательно, удельное сопротивление вещества равно выраженному в омах сопротивлению куба с ребром 1 м из данного вещества при токе, параллельном одному из ребер куба. Единицей удельного сопротивления является *1 ом-метр (Ом·м)*.

2. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Участок цепи, на котором действуют сторонние силы (наряду с электростатическими), называют *неоднородным участком цепи*. Работа по перемещению зарядов на таком участке складывается из работы электростатических сил $A_э$ и работы сторонних сил $A_{см}$:

$$A = A_э + A_{см}.$$

Напряжение на таком участке равно отношению работы всех сил, действующих на данном участке, к значению переносимого заряда. Разделим обе части записанного выше уравнения на заряд q :

$$\frac{A}{q} = \frac{A_э}{q} + \frac{A_{см}}{q}.$$

В этом равенстве левая часть — это напряжение U на неоднородном участке цепи, первый член правой части равенства — это разность потенциалов, а второй член — это э.д.с. Учитывая это, равенство можно переписать следующим образом:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \xi.$$

Из данной формулы видно, что в общем случае напряжение на участке цепи равно алгебраической сумме разности потенциалов и э.д.с. на этом участке. Если же на участке действуют только электростатические силы и, следовательно, э.д.с. равна нулю, то

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Таким образом, только в частном случае, когда на участке цепи действуют лишь электростатические силы, понятия напряжения и разности потенциалов совпадают.

Закон Ома для неоднородного участка цепи имеет вид:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \xi}{R}.$$

Это выражение можно переписать в виде

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \xi.$$

3. Закон Ома для полной цепи. На рисунке 44 изображена замкнутая цепь постоянного тока. Э.д.с. источника равна ξ , его внутреннее сопротивление r , сопротивление внешнего участка цепи R , сопротивлением проводов пренебрегаем. Ток течет в направлении, указанном стрелкой.

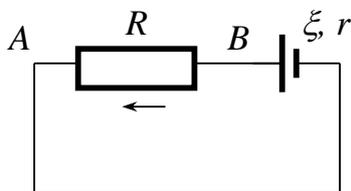


Рис. 44

По закону Ома для внешнего участка цепи AB имеем:

$$\varphi_A - \varphi_B = IR.$$

Внутренний участок цепи BA является неоднородным, следовательно, закон Ома запишется так:

$$\varphi_B - \varphi_A + \xi = Ir.$$

Сложив оба равенства, получим:

$$\xi = I(R + r).$$

Откуда

$$I = \frac{\xi}{R + r}.$$

Данная формула выражает закон Ома для полной цепи: *сила тока в полной цепи равна электродвижущей силе источника, деленной на сумму сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи.*

§ 29. Последовательное и параллельное соединения проводников в электрической цепи

При последовательном соединении проводников (рис. 45, а) сила тока во всех проводниках одинакова — в противном случае заряды накапливались бы в каких-то точках цепи. Следовательно,

$$I = I_1 = I_2.$$

Измерив напряжение U на всей цепи, а затем на каждом из ее участков, можно установить, что

$$U = U_1 + U_2.$$

Этот результат также следует из равенства работы по перемещению заряда по всей цепи сумме работ на участках.

Применяя закон Ома для участка цепи ко всей внешней цепи, сопротивление которой R , и к каждому из последовательно соединенных проводников, получаем:

$$U = IR, \quad U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2.$$

Отсюда с учетом соотношения для напряжений следует:

$$IR = IR_1 + IR_2,$$

или

$$R = R_1 + R_2.$$

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений всех отдельных проводников.

Если цепь состоит не из двух, а из нескольких последовательно соединенных проводников с сопротивлениями $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, то общее сопротивление цепи

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

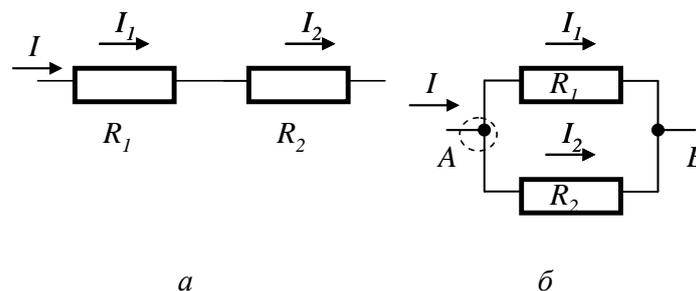


Рис. 45

При параллельном соединении проводников (рис. 45, б) напряжения U_1 и U_2 одинаковы, так как резисторы присоединены к одним и тем же точкам цепи и равны напряжению на всей цепи:

$$U = U_1 = U_2.$$

Измерив силу тока в неразветвленной цепи и в каждой ее ветви, получаем:

$$I = I_1 + I_2.$$

Этот результат можно получить также из следующих соображений. Окружим мысленно точку A замкнутой поверхностью. За время t в эту поверхность за счет тока I втекает заряд q , а за счет токов I_1 и I_2 вытекают заряды q_1 и q_2 . По закону сохранения электрического заряда

$$q = q_1 + q_2.$$

Взяв производную по времени от обеих частей, получим соотношение для силы тока.

Из закона Ома для участка цепи следует:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Отсюда с учетом соотношения для силы тока получаем:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Величина, обратная сопротивлению всего разветвленного участка цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого из параллельно соединенных проводников.

Все формулы, полученные для параллельного соединения двух проводников, справедливы для параллельного соединения любого их числа.

Шунт к амперметру. Дополнительное сопротивление к вольтметру. Каждый измерительный прибор рассчитывают на определенную максимальную для него силу тока или на предельное для него напряжение. Но всегда оказывается возможным расширить пределы измерения данным прибором.

Для увеличения предела измерения силы тока параллельно амперметру присоединяют проводник, через который проходит часть измеряемого тока. Сопротивление этого проводника, называемого *шунтом*, рассчитывают так, чтобы сила тока через амперметр не превышала его предельного значения, а остальная часть тока шла бы через шунт. При этом, разумеется, изменится цена деления шкалы данного прибора.

Поясним это примером. Амперметром, сопротивление которого равно R_a , рассчитанным на максимальную силу тока I_a , требуется измерить силу тока в цепи I_y , которая может достигать значений, в n раз превышающих максимально допустимую силу тока в амперметре ($I_y = nI_a$). Чему должно быть равно сопротивление $R_{ш}$ шунта (рис. 46, а)?

Применяя формулы для параллельного соединения проводников, получаем:

$$I_{ш} = I_y - I_a = (n-1)I_a$$

и

$$I_a R_a = I_{ш} R_{ш}.$$

Решая эти уравнения, найдем сопротивление шунта:

$$R_{ш} = R_a \frac{I_a}{I_y - I_a} = \frac{R_a}{n-1}.$$

Отсюда следует, что если амперметром, рассчитанным на силу тока, например, до 1 А, нужно измерить токи, в 10 раз большие ($n = 10$), то сопротивление шунта должно быть меньше сопротивления амперметра в 9 раз. При этом цена каждого деления увеличивается в 10 раз, а точность измерения во столько же раз уменьшается.

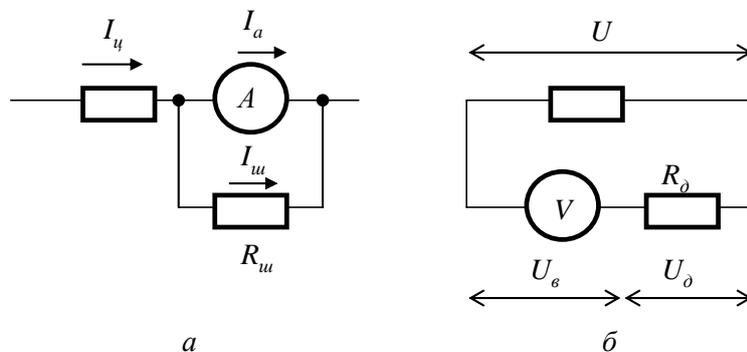


Рис. 46

Чтобы увеличить пределы измерения напряжения вольтметром, последовательно ему подключают дополнительный резистор.

Определим, каким должно быть сопротивление резистора R_∂ (рис. 46, б), чтобы вольтметром, рассчитанным на максимальное напряжение U_∂ , можно было измерять напряжение U на резисторе R , в n раз большее ($U = nU_\partial$).

Применяя формулы для последовательного соединения проводников, получаем:

$$U_\partial = U - U_\partial = (n-1)U_\partial$$

и

$$\frac{U_\partial}{R_\partial} = \frac{U}{R}.$$

Решая эти уравнения, найдем *дополнительное сопротивление*:

$$R_\partial = R_\partial \frac{U - U_\partial}{U_\partial} = (n-1)R_\partial.$$

Обычно в технических приборах шунты к амперметрам и дополнительные сопротивления к вольтметрам находятся внутри самих приборов.

§ 30. Правила Кирхгофа

Для упрощения расчета разветвленных цепей, содержащих неоднородные участки, Г. Р. Кирхгофом были созданы специальные правила.

Рассмотрим цепь, в некоторых точках которой (1 и 3) соединяются три проводника (рис. 47). Точки разветвленной цепи, в которых сходятся не менее трех проводников, называются *узлами* цепи.

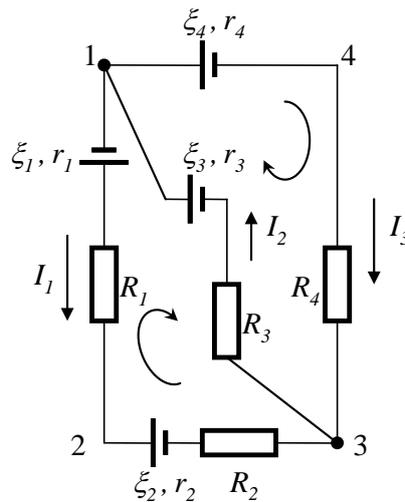


Рис. 47

В узлах не может происходить накопление зарядов или разрыв потока упорядоченно движущихся частиц. Поэтому суммарный ток, втекающий в узел, равен суммарному току, вытекающему из узла (рис. 48).

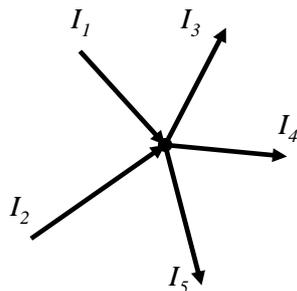


Рис. 48

Если ток втекает в узел, то силу тока считают положительной величиной, если вытекает из узла, то отрицательной.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам и формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма сил токов для каждого узла равна нулю*:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$$

В рассматриваемом случае (рис. 48) I_1 и I_2 — величины положительные, а I_3 , I_4 и I_5 — отрицательные.

Второе правило Кирхгофа относится к замкнутым контурам разветвленной цепи. Условимся считать положительным направление обхода контура по часовой стрелке. Токи,

идущие в положительном направлении обхода, будем считать положительными, противоположные токи — отрицательными. Точно так же будем приписывать электродвижущим силам знак плюс, если они создают ток в положительном направлении обхода контура; в противном случае — знак минус (рис. 49).

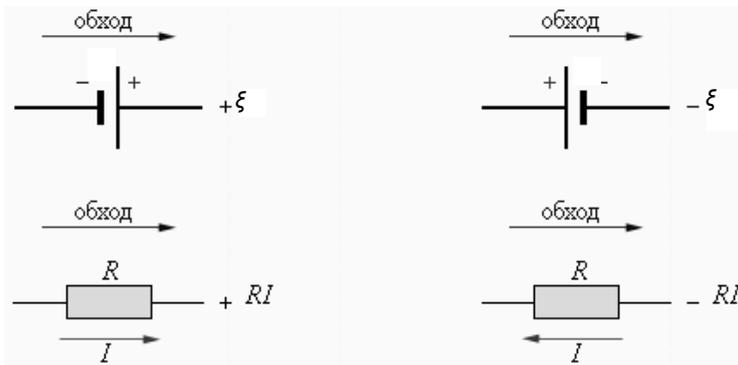


Рис. 49

Второе правило Кирхгофа утверждает, что в замкнутом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма электродвижущих сил источников тока равна алгебраической сумме произведений сил тока на сопротивления соответствующих участков этого контура:

$$\sum \xi = \sum IR.$$

При расчете разветвленной цепи надо, пользуясь правилами Кирхгофа, составить независимые уравнения для нескольких узлов и контуров; число уравнений должно равняться числу искомых величин (сил тока, э.д.с. и сопротивлений). Для составления независимых уравнений нужно использовать только такие контуры, которые различаются хотя бы одним участком, и только такие узлы, которые различаются хотя бы одной силой тока. Направления искомых сил тока выбираются произвольным образом. Если направление, принятое для какой-либо из сил тока, не соответствует действительному, то в результате расчета по правилам Кирхгофа эта сила тока получится отрицательной.

Рассмотрим замкнутый контур 1231 ; для него второе правило Кирхгофа запишется так:

$$-\xi_1 - \xi_3 + \xi_2 = -I_1 r_1 - I_1 R_1 - I_1 r_2 - I_1 R_2 - I_2 R_3 - I_2 r_3$$

или

$$\xi_1 + \xi_3 - \xi_2 = I_1(r_1 + R_1 + r_2 + R_2) + I_2(R_3 + r_3).$$

Аналогично для контура 1431 :

$$\xi_3 - \xi_4 = I_3(r_4 + R_4) + I_2(R_3 + r_3).$$

Добавив к двум последним уравнениям условие равенства нулю алгебраической суммы сил токов в любой узловой точке (первое правило Кирхгофа), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \xi_1 + \xi_3 - \xi_2 = I_1(r_1 + R_1 + r_2 + R_2) + I_2(R_3 + r_3); \\ \xi_3 - \xi_4 = I_3(r_4 + R_4) + I_2(R_3 + r_3); \\ I_2 - I_1 - I_3 = 0. \end{cases}$$

Мы получили линейную систему из трех уравнений, она разрешима при наличии не более трех неизвестных величин.

§ 31. Работа и мощность электрического тока

Работу сил электрического поля, создающего электрический ток, называют *работой тока*. Работа тока на участке цепи с электрическим сопротивлением R за время Δt равна

$$A = \Delta qU = IU\Delta t = I^2 R \Delta t.$$

Мощность электрического тока равна отношению работы тока ко времени, за которое эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Работа электрического тока выражается в джоулях, мощность — в ваттах.

Если на участке цепи под действием электрического поля не совершается механическая работа и не происходят химические превращения веществ, то работа электрического поля приводит только к нагреванию проводника. При этом работа электрического тока равна количеству теплоты, выделяемому проводником с током:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

Этот закон был экспериментально установлен английским ученым Дж. Джоулем и русским ученым Э. Х. Ленцем, поэтому носит название *закона Джоуля — Ленца*.

§ 32. Действие электрического тока на биологический организм

Тело человека, как и любой живой организм, является хорошим проводником электрического тока. Однако по проводимости организм очень неоднороден, в нем сложным образом чередуются хорошо проводящие участки (нервные ткани; биологические жидкости, содержащие значительное число ионов) и участки с низкой проводимостью (кожа, костная и связочная ткани, оболочки клеток).

Проводимость отдельных участков тканей или областей организма, находящихся между электродами, наложенными на поверхность тела, зависит главным образом от сопротивления слоя кожи и подкожно-жировой клетчатки. Пройдя через этот слой, ток разветвляется и идет через более глубоко лежащие ткани множеством параллельных ветвей по путям наименьшего сопротивления. Эти пути лежат вдоль кровеносных и лимфатических сосудов, оболочек нервных стволов и т.п. Пути тока в живом организме могут быть очень сложными.

Электропроводимость кожи, через которую ток проходит в основном по каналам потовых и отчасти сальных желез, зависит от толщины и состояния ее поверхностного слоя. Тонкая и особенно влажная кожа, а также кожа с поврежденным наружным слоем эпидермиса хорошо проводит ток. Наоборот, сухая огрубевшая кожа — плохой проводник.

В структуре тканей имеются системы, состоящие из двух хорошо проводящих ток сред (тканевая жидкость), разделенных плохим проводником или диэлектриком. Так, в основном структурном элементе тканей — клетке у наружного слоя протоплазмы (клеточной мембраны или оболочки) — низкая проводимость, а у остальной части протоплазмы и омывающей клетку тканевой жидкости достаточно высокая проводимость. Такие системы в электрическом отношении подобны конденсаторам. При прохождении по тканям электрического тока имеют место поляризационные явления, например, происходит скопление зарядов (ионов) у полупроницаемых перегородок. Это придает тканям емкостные свойства.

Таким образом, эквивалентная схема тканей организма состоит из сопротивлений и конденсаторов, включенных последовательно или параллельно.

Электрический ток, проходя через организм человека, раздражает и возбуждает живые ткани. Степень возникающих изменений зависит от величины тока, его частоты. Постоянный ток вызывает произвольное сокращение мышц, параличи, расстройство дыхания, кровообращения. Особенно опасно, если ток проходит через жизненно важные органы — сердце, мозг. Если ток протекает между руками через сердце, то при силе тока $\approx 0,025$ А наступает расстройство дыхания (сокращение мышц грудной клетки), при $I \approx 0,08$ А — аритмия сердца, при $I \approx 0,1—0,4$ А — фибрилляция желудочков сердца, а при $I \approx 0,4—1,0$ А — обратимая остановка сердца. Сильные токи приводят к тяжелым ожогам.

Раздражающее действие слабых токов используют при физиологических исследованиях, а также для лечебных целей — восстановления проводимости нервов, сократительной способности мышц (электростимуляция), восстановления костной ткани при переломах. Сильные электрические импульсы применяются для раздражения сердца после его остановки.

Быстропеременные токи легко переносятся организмом. Токи с частотой $>10^4$ Гц не вызывают сокращения мышц, они приводят к разогреву тканей и влияют на обмен веществ в клетках.

Первичное действие тока связано с изменением концентрации ионов в клетках и поляризационным процессом, что приводит к нарушению нормального для клетки распределения зарядов, а следовательно, ее функций. В случае переменного тока ионы совершают возвратно-поступательное движение и раздражающее действие тока падает. При больших частотах смещения ионов становятся исчезающе малыми.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. При работе с основными понятиями главы «Постоянный электрический ток» предлагаем Вам обратиться к интерактивным анимациям из «Единой коллекции цифровых образовательных ресурсов». Подготовьте комментарий к каждой из анимаций, проделайте виртуальные опыты, сформулируйте на основе проведенных экспериментов выводы.

http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba072-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_16.swf
 Расчет сопротивления проводника. Удельное сопротивление. Реостаты.

http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba071-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_15.swf
 Закон Ома.

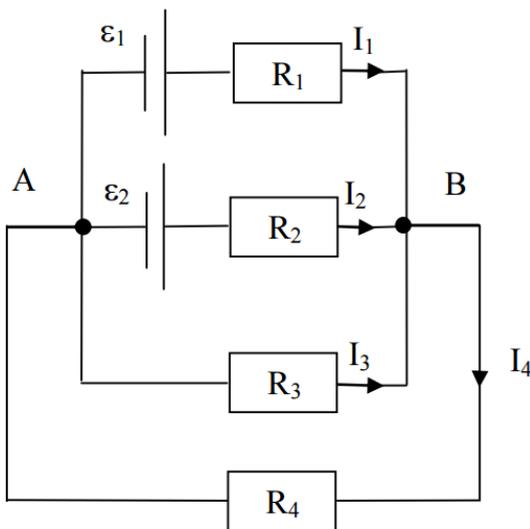
http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba073-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_17.swf
 Последовательное соединение проводников.

http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba074-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_18.swf
 Параллельное соединение проводников.

http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba075-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_19.swf
 Работа и мощность электрического тока.

http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/669ba076-e921-11dc-95ff-0800200c9a66/3_20.swf
 Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля-Ленца.

2. Пользуясь правилами Кирхгофа, составьте для предложенной цепи все возможные независимые уравнения. Сопротивлением источников тока можно пренебречь.



3. Каково действие электрического тока на биологический организм? При ответе на вопрос опирайтесь на материал видеоролика о негативном влиянии электрического тока на человека (<http://www.youtube.com/watch?v=tVw4A68XN0>). Ответ представьте в виде таблицы, указав для каждого примера соответствующую ему силу тока.

Негативные последствия действия тока на биологический организм	Действия тока, используемые в медицинских целях
1.	1.
2.	2.
...	...

§ 33. Индукция магнитного поля

В 1820 г. французский физик А. Ампер установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи текут в противоположных направлениях (рис. 50). Эти взаимодействия происходят через посредство *магнитного поля*. Магнитное поле представляет собой вид материи, посредством которого осуществляется *взаимодействие движущихся электрических зарядов*. опыты показали, что магнитное поле сопутствует любому переносу зарядов в рассматриваемой системе координат: току в проводах, жидкостях и газах, движению электронов или ионов в вакууме, перемещению заряженного тела. Вокруг покоящихся в данной системе координат зарядов магнитное поле не обнаруживается.

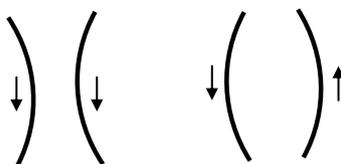


Рис. 50

Обнаружить магнитное поле можно по его силовому действию на токи, движущиеся заряженные частицы, намагниченные тела (магнитную стрелку). Для изучения магнитного поля можно взять малый замкнутый пробный контур с током и помещать его в исследуемые точки поля. Магнитное поле ориентирует такой свободный контур (как и магнитную стрелку) определенным образом. Опыт показывает, что максимальное значение момента сил M_{max} , поворачивающего пробный контур, пропорционально площади S контура и силе тока I в нем:

$$M_{max} \sim IS.$$

Величина

$$p_m = IS$$

является модулем так называемого *магнитного момента* контура с током. Сам же магнитный момент представляет собой вектор:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

где \vec{n} — единичный вектор нормали к плоскости контура, связанный с направлением тока I в контуре (рис. 51) правилом правого винта.

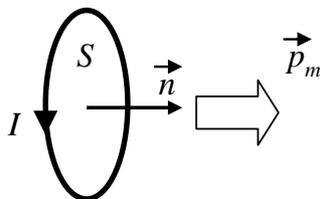


Рис. 51

Отношение

$$\frac{M_{max}}{p_m} = B$$

в данной точке поля остается постоянным и является характеристикой поля, называемой *магнитной индукцией*. Как показано на рисунке 52, магнитная индукция \vec{B} — вектор, направле-

ние которого совпадает с направлением нормали к плоскости пробного контура с током в положении его устойчивого равновесия (или с направлением северного полюса N магнитной стрелки). Вектор магнитной индукции \vec{B} — основная *силовая характеристика* магнитного поля (аналогичная вектору напряженности для электрического поля). Единицей магнитной индукции является *тесла* ($Tл$) в честь выдающегося югославского физика Н. Тесла:

$$1 Tл = \frac{1 Hм}{1 A \cdot м^2} = 1 \frac{H}{A \cdot м} .$$

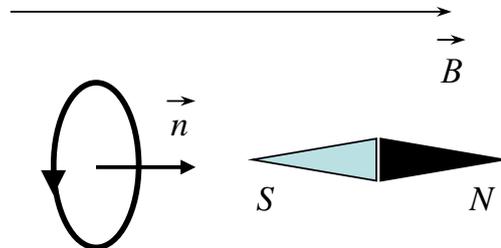


Рис. 52

Для магнитных полей справедлив *принцип суперпозиции*: магнитная индукция поля, создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме индукций полей каждого из токов в отдельности.

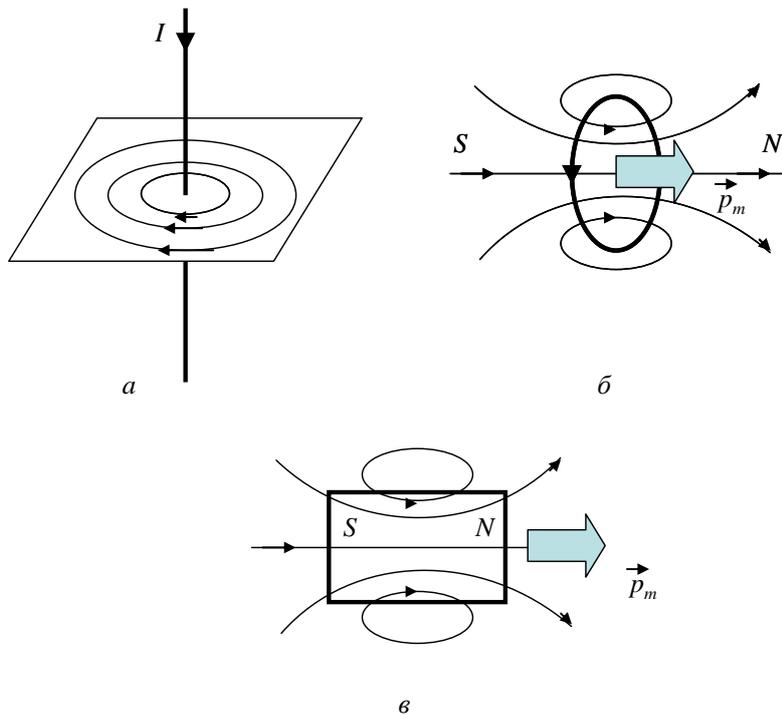


Рис. 53

Магнитное поле изображают при помощи линий магнитной индукции, которые строятся по тем же правилам, что и линии электрического поля. Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они не имеют начала и конца. Такие поля называются *вихревыми*. Характер линий индукции магнитного поля прямого тока показан на рисунке 53, *а*, одиночного витка с током — на рисунке 53, *б*, постоянного магнита — на рисунке 53, *в*.

Два полюса магнита — северный N и южный S — всегда сосуществуют вместе. Сколь угодно мелкое дробление магнита не приводит к разделению его полюсов; они существуют только парами. Соленоиду или витку с током, как и постоянному магниту, можно приписать магнитные полюсы и представить их как магнитный диполь, характеризуемый вектором магнитного момента \vec{p}_m . Любой магнитный диполь является носителем собственного магнитного поля.

§ 34. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера. Сила Лоренца

Ампер на основе опытов (1820 г.) установил, что на отрезок проводника длиной l с током I со стороны однородного магнитного поля, индукция которого \vec{B} , действует так называемая *сила Ампера*. Ее модуль:

$$F_a = IBl \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением тока в проводнике и вектором индукции \vec{B} . Данная формула выражает *закон Ампера*. Направление силы Ампера можно найти по *правилу левой руки*: если расположить левую руку так, чтобы четыре пальца были направлены по току, а нормальная к проводнику составляющая вектора \vec{B} входила в ладонь, то отогнутый большой палец укажет направление силы F_a (рис. 54). Сила Ампера перпендикулярна плоскости, в которой расположены вектор \vec{B} и ток I , поэтому она всегда перпендикулярна и проводнику с током.

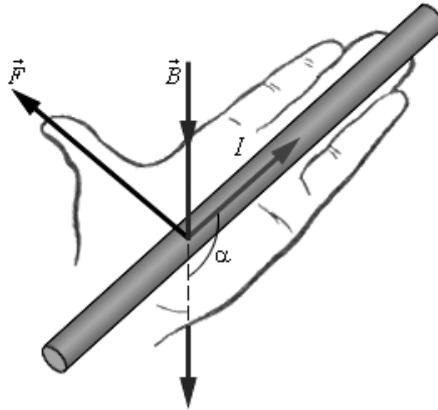


Рис. 54

Для проводника сложной формы можно определить силы, действующие на отдельные элементы тока, а потом векторно их просуммировать и найти результирующую силу.

Силы Ампера не являются центральными, у них нет силового центра, как у гравитационных или кулоновских сил. Действие сил Ампера на проводник с током означает, что на каждую из заряженных частиц, участвующих в переносе заряда, также действует некоторая сила со стороны магнитного поля.

Пусть в проводнике длиной l упорядоченно движутся электрические заряды со средней скоростью v . Тогда за время

$$t = \frac{l}{v}$$

через поперечное сечение проводника пройдет суммарный электрический заряд

$$Q = It = I \frac{l}{v}.$$

На этот проводник действует сила Ампера

$$F_a = IBl \sin \alpha.$$

Но

$$Il = Qv,$$

следовательно, если мы в выражении для силы Ампера произведем замену, то получим выражение для силы, действующей на суммарный движущийся заряд:

$$F = QBv \sin \alpha.$$

Разделив обе части равенства на число движущихся зарядов, определим силу, действующую на заряд:

$$F_d = qBv \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Это так называемая *сила Лоренца*.

Сила Лоренца направлена перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы \vec{v} и \vec{B} . Направление данной силы можно определить по правилу левой руки (при $q > 0$ четы-

ре пальца располагаются вдоль вектора \vec{v} , при $q < 0$ — в противоположном направлении). Направления сил Лоренца, которые действуют на положительный и отрицательный заряды, показаны на рисунке 55. Сила Лоренца действует только на движущийся относительно магнитного поля заряд (в рассматриваемой системе координат).

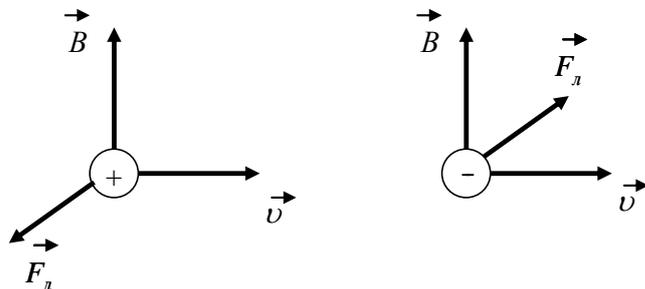


Рис. 55

Характерная особенность силы Лоренца состоит в том, что она, будучи всегда перпендикулярной к вектору скорости, не совершает работы и не изменяет кинетической энергии свободной частицы. При движении заряженной частицы в магнитном поле может изменяться только направление скорости, но не ее модуль.

§ 35. Движение заряженных частиц в магнитном поле

При движении заряженной частицы вдоль линий индукции ($\vec{v} // \vec{B}$) сила Лоренца равна нулю.

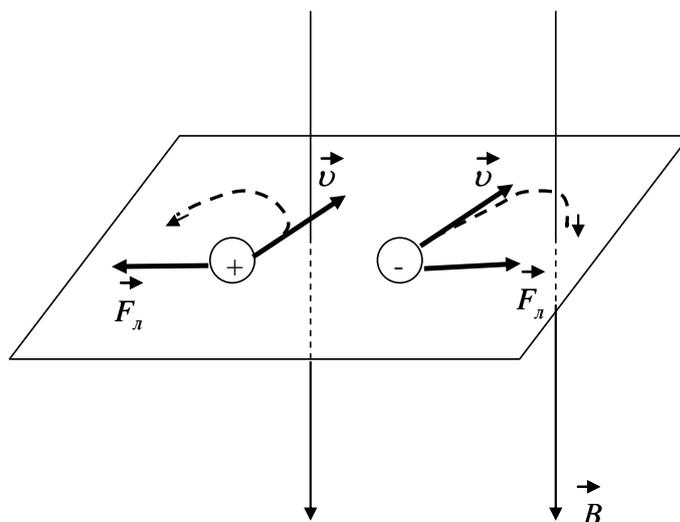


Рис. 56

Если частица, имеющая массу m и заряд q , движется поперек линий индукции ($\vec{v} \perp \vec{B}$) со скоростью \vec{v} , то сила Лоренца, перпендикулярная скорости, сообщает ей центростремительное ускорение. Частица описывает окружность в плоскости, перпендикулярной линиям индукции (рис. 56). Частицы с зарядами разного знака «закручиваются» полем в противоположных направлениях. Из записанного для этого случая уравнения второго закона Ньютона

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

можно найти радиус траектории:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{v}{\frac{q}{m}B}.$$

Отсюда видно, что радиус обратно пропорционален удельному заряду частицы q/m . Период обращения частицы

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\frac{q}{m} B}$$

не зависит от ее скорости, а определяется лишь удельным зарядом q/m и индукцией магнитного поля B .

Если частица влетает в магнитное поле под углом α к линиям индукции, то ее движение происходит по винтовой линии, ось которой совпадает с направлением вектора индукции (рис. 57). Составляющая \vec{v}_\perp скорости обеспечивает движение частицы по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, а составляющая \vec{v}_\parallel — ее движение вдоль линий индукции поля.

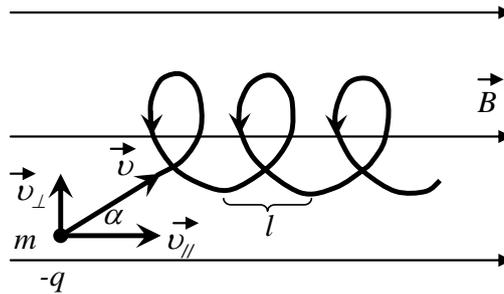


Рис. 57

Радиус винтовой линии:

$$R = \frac{v_\perp}{\frac{q}{m} B} = \frac{v \sin \alpha}{\frac{q}{m} B}.$$

За время T одного оборота частица смещается на расстояние l (шаг винтовой линии):

$$l = v_\parallel T = \frac{2\pi}{\frac{q}{m} B} v \cos \alpha.$$

Магнитные поля наряду с электрическими позволяют управлять движением заряженных частиц в электронных микроскопах, телевизорах, ускорителях и т.д.

Магнитное поле для заряженных частиц может явиться своеобразной «магнитной ловушкой»: попав в такое поле, частица не может покинуть его — она как бы «навивается» на линии индукции. За счет этого эффекта с помощью сильных магнитных полей удается удержать от рассеивания и сконцентрировать сильноионизированный высокотемпературный газ (плазму). Своеобразной защитой для всего живого на Земле от потоков заряженных частиц из космоса является магнитное поле Земли¹. Упрощенная картина силовых линий магнитного поля Земли показана на рисунке 58. Отметим, что магнитные полюсы не только не совпадают с соответствующими географическими полюсами, но, более того, северный полюс земного магнита находится в южном, а южный полюс — в северном полушарии. Быстрые заряженные частицы, электроны и протоны, выбрасываемые Солнцем, образуют так называемый «солнечный ветер».

В магнитном поле Земли траектории движения частиц изменяются, и они огибают Землю. На расстояниях примерно от 500 до 60000 км заряженные частицы движутся, навиваясь на линии индукции магнитного поля Земли (рис. 58), совершая колебания от одного полюса к другому за 0,1—1 с. Эта область космоса называется радиационным поясом Земли.

¹ Магнитные поля широко распространены во Вселенной. Они существуют у звезд, в космическом пространстве; имеется магнитное поле у Солнца и планет Солнечной системы.

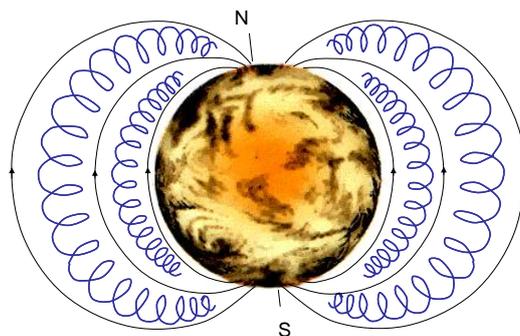


Рис. 58

Лишь в полярных областях небольшая часть этих частиц вторгается в верхние слои атмосферы из радиационного пояса Земли и вызывает полярные сияния.

§ 36. Магнитное поле в веществе

Опыт показывает, что все вещества, помещенные в магнитное поле, приобретают магнитные свойства, т.е. намагничиваются, и поэтому в некоторой мере изменяют внешнее (первоначальное) поле. Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция \vec{B} магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции \vec{B}_0 магнитного поля в вакууме, называется *магнитной проницаемостью*:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

В зависимости от значения μ различают сильномагнитные ($\mu \gg 1$) и слабомагнитные ($\mu \approx 1$) вещества. Сильномагнитные — это ферромагнетики, слабомагнитные — парамагнетики и диамагнетики.

Вещества, которые значительно усиливают магнитное поле, называются *ферромагнетиками*. Кроме железа к ферромагнетикам относятся никель, кобальт и некоторые сплавы — электротехнические стали, пермаллой, пермендюр, алнико, инвар и др. У данного класса веществ значения магнитной проницаемости достигают нескольких десятков, сотен и даже тысяч единиц. Магнитная проницаемость ферромагнетиков не является постоянной величиной, она зависит от индукции намагничивающего поля \vec{B}_0 . Кроме того, процесс намагничивания ферромагнетиков зависит от предыдущей истории намагничивания вещества. Это явление называется *гистерезисом*.

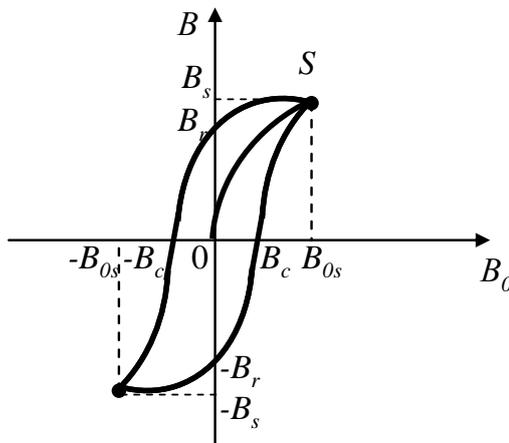


Рис. 59

На рисунке 59 показана так называемая петля гистерезиса. Вначале индукция магнитного поля в ферромагнетике растет вместе с увеличением индукции намагничивающего поля B_0 .

Этот рост изображен кривой OS . Дальнейшее возрастание индукции намагничивающего поля ($B_0 > B_{0s}$) не приводит к увеличению индукции поля в ферромагнетике, индукция сохраняет постоянное значение B_s , называемое намагниченностью насыщения.

При уменьшении индукции намагничивающего поля B_0 индукция поля в ферромагнетике в процессе его размагничивания остается все время большей, чем в процессе намагничивания. Когда исчезает намагничивающее поле, ферромагнетик сохраняет остаточную намагниченность — остаточную индукцию B_r .

Чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, надо создать магнитное поле с противоположно направленной индукцией ($-B_c$). Значение индукции B_c , при котором сердечник размагничивается, называется коэрцитивной силой.

Если далее увеличивать индукцию намагничивающего поля, то процесс намагничивания ферромагнетика повторится до насыщения. Затем можно повторить процесс размагничивания, и мы получим на графике замкнутую петлю гистерезиса.

Форма гистерезисной петли и значение коэрцитивной силы определяют область применения тех или иных ферромагнетиков. Материалы с малой коэрцитивной силой называются «магнитомягкими». Они используются для изготовления сердечников электромагнитов, трансформаторов, машин постоянного и переменного тока. «Магнитотвердыми» (или «магнитожесткими») называются материалы с большим значением коэрцитивной силы, которые трудно размагнитить. Эти материалы используются для изготовления постоянных магнитов.

Парамагнетиками называются вещества, которые слабо намагничиваются в направлении индукции внешнего поля. Магнитная проницаемость даже наиболее сильных парамагнетиков мало отличается от единицы: 1,00036 у платины и 1,0034 у жидкого кислорода.

Диамагнетиками называются вещества, которые слабо намагничиваются в направлении, противоположном индукции намагничивающего поля, т.е. они ослабляют внешнее магнитное поле. Диамагнитными свойствами обладают, например, серебро, свинец, кварц, большинство газов. Магнитная проницаемость диамагнетиков отличается от единицы не более чем на десятитысячные доли. Самый сильный из диамагнетиков — висмут — обладает магнитной проницаемостью, равной 0,999824.

§ 37. Магнитный и механический моменты электрона. Спин. Магнитный момент атома

Движение электронов в атоме можно уподобить элементарным замкнутым токам. Исходя из классических представлений, положим, что движение электрона происходит по круговой орбите радиуса r со скоростью v . Это движение эквивалентно некоторому круговому току I , с которым связан орбитальный магнитный момент p_{ml} . Направление вектора \vec{p}_{ml} указано на рисунке 60. Зная частоту вращения электрона на орбите

$$\nu = \frac{v}{2\pi r},$$

можно найти соответствующую силу тока

$$I = ev$$

и значение орбитального магнитного момента

$$p_{ml} = IS = I\pi r^2 = \frac{evr}{2},$$

где e — заряд электрона и S — площадь, ограниченная круговой орбитой.

Наряду с орбитальным магнитным моментом электрон обладает также орбитальным моментом импульса — механическим моментом:

$$L_l = mvr,$$

где m — масса электрона. Направление вектора \vec{L}_l связано с направлением движения электрона правилом правого винта.

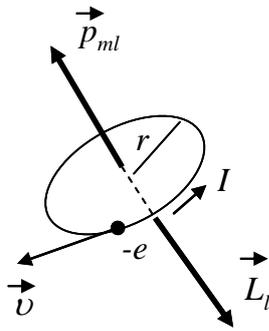


Рис. 60

Таким образом, с орбитальным движением электрона связаны два вектора — \vec{p}_{ml} и \vec{L}_l , имеющие противоположные направления (так как $e < 0$). Отношение магнитного момента частицы к ее механическому моменту называется *гиромагнитным отношением* и обозначается Γ . Для орбитального движения электрона

$$\Gamma_l = -\frac{e}{2m},$$

знак минус указывает на то, что векторы моментов имеют противоположные направления.

При намагничивании тела магнитные моменты содержащихся в нем электронов испытывают ориентирующее действие со стороны внешнего магнитного поля. Поскольку при этом одновременно должны ориентироваться связанные с ними механические моменты, то намагничивание образца должно сопровождаться его вращением (момент импульса системы электроны — образец не должен меняться). А. Эйнштейн и А. де Гааз проделали опыт (1915 г.) по намагничиванию железного стерженька, подвешенного на упругой нити и помещенного в магнитное поле катушки с током. Намагничивание стерженька действительно сопровождалось легким его вращением. Направление вращения изменялось при изменении направления магнитного поля. Это явление называют *магнитомеханическим*. Был обнаружен и обратный эффект (С. Барнетт, 1915): быстрое вращение образца приводит к его намагничиванию.

Из опытов следовало, что частицы — носители магнитных моментов имеют отрицательный заряд; однако значение их гиромагнитного отношения оказалось равным $-e/m$, т.е. в два раза большим (по модулю) ожидаемого. Это означало, что намагничивание железного стержня нельзя объяснить орбитальным движением электронов. Снять эти затруднения оказалось возможным, если предположить, что электрон обладает также собственным моментом импульса L_s — *спином* (С. Гаудсмит и Дж. Уленбек, 1925) и жестко связанным с ним *собственным (спиновым) постоянным магнитным моментом* p_{ms} . Спиновое гиромагнитное отношение равно:

$$\Gamma_s = \frac{p_{ms}}{L_s} = -\frac{e}{m}.$$

Наличие у электронов спиновых моментов первоначально связывали с вращением электрона вокруг своей собственной оси. Однако эта модель оказалась несостоятельной. В настоящее время считают, что спин и спиновый магнитный момент — такие же неотъемлемые свойства электрона, как его заряд или масса. Классической аналогии этих понятий не существует. Наличие у электрона спинового магнитного момента p_{ms} говорит о том, что он является носителем собственного магнитного поля и ведет себя как *магнитный диполь*. Спином обладают, кроме электрона, и многие другие частицы (протон, нейтрон, позитрон, нейтрино и др.).

Общий магнитный момент атома (молекулы) является векторной суммой орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов и магнитного момента ядра:

$$\vec{p}_m = \sum \vec{p}_{msi} + \sum \vec{p}_{mli} + \vec{p}_{m,яд}.$$

У спаренных электронов магнитный момент равен нулю (скомпенсирован). Завершенные электронные слои в атомах также не обладают магнитным моментом. Ядерные моменты в тысячи раз меньше электронных (из-за большой массы ядер). У атомов ряда элементов и у молекул многих сложных веществ результирующий магнитный момент электронной оболочки оказывается равным нулю.

§ 38. Природа диа-, пара- и ферромагнетизма

У атомов одних веществ магнитные поля электронов полностью скомпенсированы. В этих веществах при отсутствии внешнего магнитного поля атомы (и молекулы) не имеют собственного магнитного поля. Эти вещества являются *диамагнетиками*. Под действием внешнего магнитного поля орбитальное движение электронов меняется таким образом, что компенсация орбитальных магнитных полей нарушается. При этом вектор индукции орбитального магнитного поля атома оказывается направленным против индукции внешнего поля (правило Ленца). Поэтому диамагнетик выталкивается из внешнего магнитного поля.

Диамагнитный эффект присущ не всем веществам, проявиться он может лишь у тех веществ, у которых орбитальные и спиновые магнитные поля атомов скомпенсированы.

У других веществ магнитные поля электронов в атомах скомпенсированы не полностью, и атом в целом оказывается подобным маленькому постоянному магниту. Обычно в веществе все эти маленькие магниты ориентированы произвольно (вследствие теплового движения), и суммарная магнитная индукция всех их полей равна нулю (рис. 61, *а*). Если же поместить вещество в магнитное поле, то все маленькие магниты-атомы повернутся во внешнем магнитном поле подобно стрелкам компаса. Векторы индукции магнитных полей атомов оказываются преимущественно направленными примерно вдоль направления вектора индукции внешнего поля (полная ориентация возможна только вблизи абсолютного нуля), поэтому магнитное поле в веществе усиливается (рис. 61, *б*). Этот эффект называется *парамагнитным*. Вещества, в которых этот эффект проявляется, — *парамагнетики*.

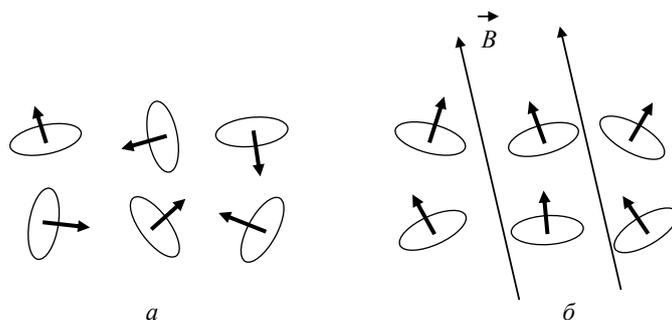


Рис. 61

В некоторых кристаллах, например в кристаллах железа, возникают условия для параллельной ориентации векторов индукции спиновых магнитных полей части электронов и их сложения. В результате этого внутри кристалла *ферромагнетика* возникают намагниченные области протяженностью 10^{-2} — 10^{-4} см. Эти самопроизвольно намагниченные области называются *доменами* (рис. 62, *а*). В отдельных доменах магнитные поля имеют различные направления и в большом кристалле взаимно компенсируют друг друга. При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов. С увеличением магнитной индукции \vec{B} внешнего поля возрастает степень упорядоченности ориентации отдельных доменов — магнитная индукция возрастает. При некотором значении индукции внешнего поля наступает полное упорядочение ориентации доменов (рис. 62, *б*), возрастание магнитной индукции прекращается. Это явление называется *магнитным насыщением*.

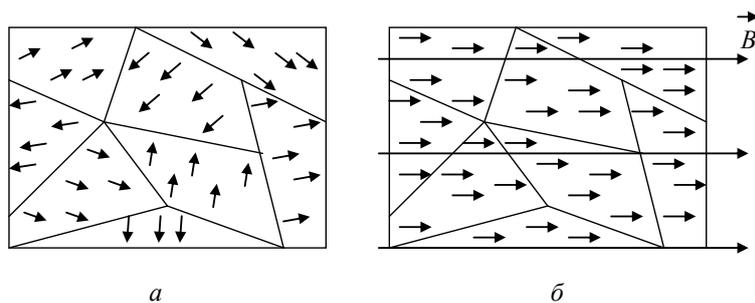


Рис. 62

При удалении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию — образец становится *постоянным магнитом*.

Упорядоченность ориентации доменов в ферромагнетике нарушается тепловыми колебаниями атомов в кристалле. Температура, выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком, называется *температурой Кюри*. Температура Кюри у железа 770°C, у кобальта 1130°C, у никеля 356°C.

§ 39. Магнитное поле и живой организм

К настоящему времени накоплено большое количество опытных фактов, свидетельствующих о влиянии магнитных полей (сильных и слабых) на биологические объекты. Это касается, например, способности многих животных и растений ориентироваться в магнитных полях, влияния магнитного поля на свойства крови, интенсивность водного обмена, активность многих ферментов, быстроту прорастания и всхожесть семян, влияния резких изменений напряженности магнитного поля Земли (магнитные бури) на самочувствие людей и поведение животных и т.д. С помощью магнитных полей удастся влиять на течение биологических процессов и некоторых химических реакций. Магнитные поля используются в лечебной медицинской практике. Опыты показали, что свойства воды, побывавшей в магнитном поле, сильно меняются.

Живой организм состоит в основном из диамагнитных веществ и лишь в небольшом количестве содержит парамагнитные частицы (свободные радикалы, ферменты, ионы). Предполагают, что универсальность действия магнитного поля на все живое обусловлена его влиянием на свойства воды, содержащейся во всех биологических объектах, в частности его влиянием на степень гидратации ионов.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Как определяются модуль и направление вектора магнитной индукции? Что такое линия магнитной индукции?
2. Как определяются модуль и направление силы Ампера? Силы Лоренца?
3. По какой траектории может двигаться заряженная частица в однородном магнитном поле? От чего зависят период обращения и радиус траектории при движении заряженной частицы в однородном магнитном поле?
4. Используя интернет-ресурсы, подготовьте сообщение о принципе действия циклотрона.
5. Охарактеризуйте магнитное поле Земли. Какова его роль в защите всего живого на Земле? Каков механизм полярных сияний? Какие существуют методы исследования магнитосферы Земли? При ответе на вопрос предлагаем Вам воспользоваться видеофильмом «Магнитное поле Земли исследуют спутники» (<http://www.youtube.com/watch?v=zlhP4eygN2U>).
6. Какими магнитными свойствами обладают вещества? Ответ представьте в виде таблицы.

Классификация веществ по виду изменения внешнего магнитного поля		Значение магнитной проницаемости	Примеры веществ	Природа магнетизма
Слабوماгнитные	Диамагнетики			
	Парамагнетики			
Сильномагнитные	Ферромагнетики			

7. Используя интернет-ресурсы, подготовьте сообщение «Влияние магнитного поля на растительный и животный мир». При ответе опирайтесь на составленную Вами таблицу.

Знаю	Узнал(а) при подготовке сообщения	Интересно
Перечислите известные Вам факты влияния магнитного поля на растительный и животный мир	Перечислите неизвестные Вам ранее факты влияния магнитного поля на растительный и животный мир	Отметьте факты, которые для Вас являются интересными, неожиданными

Электрический ток может проходить через различные вещества: металлы, растворы и расплавы электролитов, газы (при определенных условиях), полупроводники.

Для возникновения электрического тока в какой-либо среде необходимо, чтобы в ней имелись заряженные частицы, способные перемещаться под действием электрического поля. Этими частицами могут быть как электроны, так и ионы. Выяснить природу тока — значит установить, какие именно частицы переносят электрический заряд в данной среде.

Основной закономерностью для тока в любом проводнике служит зависимость силы тока от приложенного напряжения. График этой зависимости называется *вольтамперной характеристикой* данного проводника.

Рассмотрим природу и закономерности электрического тока в различных средах.

§ 40. Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлических проводниках никаких изменений в этих проводниках, кроме их нагревания, не вызывает. Это было подтверждено опытами Э. Рикке (1901 г.). В этих опытах электрический ток пропускали в течение года через три прижатых друг к другу хорошо отшлифованных цилиндра — медный, алюминиевый и снова медный (рис. 63). После окончания опытов было установлено, что имеются лишь незначительные следы диффузии. Измерения, проведенные с высокой степенью точности, показали, что масса каждого из цилиндров осталась неизменной. Поскольку массы атомов меди и алюминия существенно отличаются друг от друга, то масса цилиндров должна была бы заметно измениться, если бы носителями заряда были ионы.

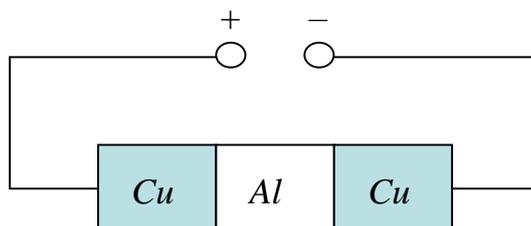


Рис. 63

Следовательно, огромный заряд, который прошел через цилиндры, был перенесен частицами, которые одинаковы и в меди, и в алюминии. Естественно предположить, что это электроны. Предположение об электронной природе электрического тока в металлах подтверждено опытами русских физиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси и американских физиков Т. Стюарта и Р. Толмена. В этих опытах было обнаружено, что при резкой остановке быстро вращающейся катушки в проводе катушки возникает электрический ток, создаваемый отрицательно заряженными частицами — электронами.

Электроны в металлах находятся в непрерывном движении. Их беспорядочное движение напоминает движение молекул идеального газа. Это дало основание считать, что электроны в металлах образуют своеобразный электронный газ. Но скорость движения электронов в металле значительно больше скорости молекул в газе ($\sim 10^5$ м/с).

Когда в металле создается электрическое поле, оно действует на электроны с некоторой силой и сообщает им ускорение в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля. Поэтому в электрическом поле беспорядочно движущиеся электроны смещаются в одном направлении, т.е. движутся упорядоченно.

Сталкиваясь с ионами кристаллической решетки, электроны отдают им свою энергию. А увеличение энергии ионов означает повышение температуры проводника. Вот почему при

прохождении тока проводники нагреваются. В промежутках между столкновениями с ионами электроны ускоряются электрическим полем и опять приобретают кинетическую энергию благодаря работе, которую совершает электрическое поле.

Скорость упорядоченного переноса электронов в сотни миллионов раз меньше средней скорости теплового движения электронов. Между тем известно, что при замыкании электрической цепи все приборы, на каком бы расстоянии они ни находились друг от друга, начинают действовать практически одновременно. Таким образом, скорость распространения тока и скорость упорядоченного перемещения носителей тока — это не одно и то же.

Когда говорят об огромной скорости распространения тока в проводниках, то имеют в виду, что с такой скоростью распространяется действие электрического поля на заряды в проводнике. Оно вовлекает в упорядоченное движение почти мгновенно все свободные электроны, находящиеся в различных точках проводника, даже очень удаленных друг от друга. Электрическое поле распространяется со скоростью света. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости распространения тока. В то же время электроны в проводнике, в любой его точке, перемещаются под действием поля с очень малой скоростью, измеряемой долями миллиметра в секунду.

Из закона Ома для участка цепи следует, что при постоянном сопротивлении сила тока прямо пропорциональна напряжению. Следовательно, вольтамперная характеристика для металлического проводника представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 64). Проводник с такими свойствами называется *резистором*.

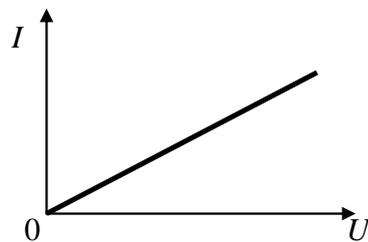


Рис. 64

Угол наклона графика к оси напряжений зависит от сопротивления проводника. Тангенс угла наклона графика равен величине, обратной сопротивлению (в заданном масштабе на осях координат).

Сопротивление металлов связано с тем, что электроны, движущиеся в проводнике, взаимодействуют с ионами кристаллической решетки и теряют при этом часть энергии, которую они приобретают в электрическом поле. Сопротивление металлов зависит от температуры. При увеличении температуры усиливаются беспорядочные колебания ионов в узлах кристаллической решетки, электроны все чаще сталкиваются с узлами решетки, сопротивление увеличивается. В 1911 г. голландский ученый Г. Камерлинг-Оннес обнаружил, что при понижении температуры ртути до 4,1 К ее удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 65).

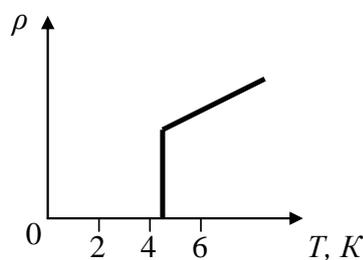


Рис. 65

В дальнейшем ему удалось это же явление наблюдать и у ряда других металлов при их охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю. Оказалось, что при некоторой характерной для каждого из них температуре сопротивление падало до нуля. Явление полной потери металлом электрического сопротивления при определенной температуре получило название *сверхпроводимости*.

Прохождение тока в сверхпроводнике происходит без потерь энергии, поэтому однажды возбужденный в сверхпроводящем кольце электрический ток может существовать неограниченно долго без изменения.

Сверхпроводящие материалы используются в электромагнитах. Ведутся исследования, направленные на создание сверхпроводящих линий электропередачи.

Применение явления сверхпроводимости в широкой практике может стать реальностью благодаря открытию в 1987 г. сверхпроводимости керамик — соединений лантана, бария, меди и кислорода. Сверхпроводимость таких керамик сохраняется до температур около 100 К. Теоретически предсказана даже возможность получения сверхпроводящих материалов при комнатной температуре.

Перечислим лишь некоторые возможности технического применения сверхпроводников. Сверхпроводящие кабели способны передавать огромную энергию на большие расстояния совершенно без потерь. Отсутствие потерь энергии при передаче в таких линиях позволит отказаться от строительства ряда новых электростанций. Сверхпроводящие материалы могут служить также «накопителями» энергии: создав ток в сверхпроводящем кольце, можно сколь угодно долго сохранять энергию, расходуя ее по мере необходимости. Сверхпроводящие обмотки электромагнитов дают возможность получить сверхмощные магнитные поля, используя при этом небольшие (сравнительно с обычными) установки.

§ 41. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов

При протекании электрического тока через растворы солей, кислот и оснований, т.е. растворы электролитов, вместе с зарядом всегда переносится вещество (это явление — *электролиз*). Отсюда следует, что носителями тока в этих проводниках являются заряженные атомы или группы атомов, т.е. ионы.

При растворении в воде солей, кислот и щелочей нейтральные молекулы этих веществ расщепляются на положительные и отрицательные ионы. Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Растворы электролитов всегда содержат некоторое число ионов: катионов (положительных ионов) и анионов (отрицательных ионов). Пока электрическое поле отсутствует, ионы совершают только беспорядочное тепловое движение. Но в электрическом поле ионы, подобно электронам в металлах, начинают дрейфовать в направлении действующей на них силы: катионы — к катоду, анионы — к аноду (рис. 66).

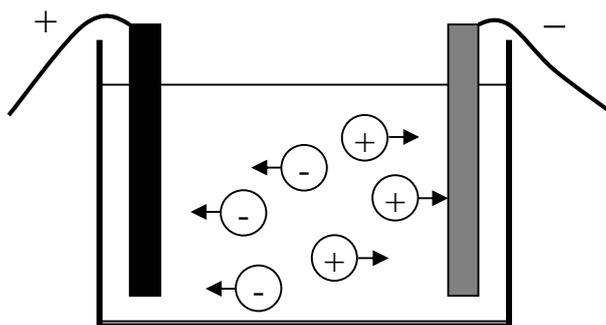


Рис. 66

Опыт показывает, что сила тока при постоянном сопротивлении электролитов линейно зависит от напряжения, т.е. для растворов электролитов справедлив закон Ома.

Электронная теория позволяет рассчитать массу веществ, выделяющихся на электродах при электролизе. Она равна произведению массы одного иона m_0 на число ионов N , которые осели на электроде. Масса одного иона

$$m_0 = \frac{M}{N_a},$$

где M — молярная масса вещества, N_a — постоянная Авогадро.

С другой стороны, число ионов, осевших на электроде, можно выразить через заряд Q , прошедший через электролит, и заряд одного иона q_0 :

$$N = \frac{Q}{q_0}.$$

Следовательно,

$$\frac{Q}{q_0} = \frac{m}{M} N_a,$$

откуда

$$m = m_0 N = \frac{MQ}{N_a q_0}.$$

Заряд любого иона равен заряду одновалентного иона, т.е. заряду электрона e , умноженному на валентность Z иона:

$$q_0 = eZ.$$

Таким образом,

$$m = \frac{M}{N_a eZ} Q = \frac{M}{N_a eZ} It.$$

Величины N_a и e являются универсальными постоянными, а M и Z постоянны для данного вещества. Поэтому выражение $\frac{M}{N_a eZ}$ — величина, постоянная для данного вещества.

Из полученной формулы следует, что масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду, прошедшему через раствор, или, другими словами, пропорциональна силе тока и времени. Эта зависимость впервые была экспериментально установлена М. Фарадеем в 30-х годах XIX века и носит название *закона Фарадея*.

Если постоянный множитель в формуле обозначить через k :

$$\frac{M}{N_a eZ} = k,$$

то закон Фарадея можно записать в виде

$$m = kIt.$$

Коэффициент k называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества. Он выражается в килограммах на кулон ($кг/Кл$).

Электролиз получил широкое применение в современном промышленном производстве. С помощью электролиза из солей и оксидов получают многие металлы, например медь, никель, алюминий. Электролитический способ дает возможность получать вещества с малым количеством примесей. Поэтому его применяют для получения многих веществ, когда требуется высокая степень химической чистоты.

Путем электролиза можно наносить тонкие слои металлов, например хрома, никеля, серебра, золота, на поверхности изделий из других металлов. Эти слои могут служить защитой изделия от окисления, повышать его прочность или просто украшать изделие. Электролитический способ покрытия изделия тонким слоем металла называется *гальваностегией*.

При более длительном пропускании тока через электролит можно получить на изделии такой толстый слой металла, который может быть отделен от него с сохранением формы. Электролитическое получение точных копий различных изделий называется *гальванопластикой*. С помощью гальванопластики получают копии изделий сложной формы, копии скульптур и других произведений искусства.

Явление электролиза лежит в основе принципа действия кислотных и щелочных аккумуляторов, где используется важное свойство процесса электролиза — его обратимость.

§ 42. Электрический ток в газах

В отличие от растворов электролита газ при нормальных условиях состоит из нейтральных молекул (или атомов) и поэтому является изолятором. Проводником электрического тока газ становится только в том случае, когда хотя бы часть его молекул ионизируется под влия-

нием внешнего воздействия (ионизатора). При ионизации из молекул газа вырывается обычно один электрон, в результате чего молекула становится положительным ионом. Вырвавшийся электрон либо остается некоторое время свободным, либо сразу же присоединяется к одной из нейтральных молекул газа, превращая ее в отрицательный ион. Таким образом, в ионизированном газе имеются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны.

Для того чтобы выбить из молекулы (атома) один электрон, ионизатор должен совершить определенную работу, называемую работой ионизации; для большинства газов она имеет значения, лежащие в пределах от 5 до 25 эВ. Ионизаторами газа могут служить рентгеновские лучи, радиоактивные излучения, космические лучи, нагревание, ультрафиолетовые лучи и некоторые другие факторы.

Наряду с ионизацией в газе идет процесс рекомбинации ионов. В результате устанавливается равновесное состояние, характеризующееся определенной концентрацией ионов, величина которой зависит от мощности ионизатора.

При наличии внешнего электрического поля в ионизированном газе возникает ток, обусловленный движением разноименных ионов во взаимно противоположных направлениях и движением электронов.

При прекращении действия ионизатора концентрация ионов в газе быстро падает до нуля (в связи с рекомбинацией и выносом ионов к электродам источника тока) и ток прекращается. Ток, для существования которого необходим внешний ионизатор, называется *несамостоятельным газовым разрядом*.

При достаточно сильном электрическом поле в газе начинаются процессы *самоионизации*, благодаря которым ток может существовать и в отсутствие внешнего ионизатора. Такого рода ток называется *самостоятельным газовым разрядом*.

Основной механизм ионизации газа при самостоятельном электрическом разряде — ионизация атомов и молекул ударами электронов. Как только в газе появляется свободный электрон, он под действием электрического поля ускоряется, его кинетическая энергия возрастает. Если эта энергия достаточна для совершения работы отрыва электрона от атома, то при соударении электрона с молекулой происходит ионизация последней.

Первичный электрон и вторичный, возникший в результате ударной ионизации, вновь ускоряются под действием электрического поля, и каждый из них при следующих соударениях освобождает еще по одному электрону и т.д. Число свободных электронов нарастает лавинообразно до тех пор, пока они не достигнут анода.

Положительные ионы, возникающие в газе, движутся под действием электрического поля от анода к катоду. При ударах положительных ионов о катод, а также под действием излучения, возникающего при развитии разряда, с катода могут освобождаться новые электроны. Они разгоняются электрическим полем и создают новые электронно-ионные лавины, и этот процесс может продолжаться непрерывно.

Еще может иметь место термоэлектронная эмиссия — испарение электронов с катода. Катод нагревается под действием ударов положительных ионов. Электроны испаряются при температурах, когда само вещество испаряется еще слабо.

На рисунке 67 представлен экспериментальный график зависимости силы тока I в газе от напряжения U между катодом и анодом источника поля. На участке кривой Oa ток возрастает приблизительно пропорционально напряжению (т.е. по закону Ома). Это объясняется тем, что с увеличением напряжения возрастает скорость упорядоченного движения ионов и электронов, а следовательно, и сила тока. Очевидно, что возрастание тока прекратится тогда, когда напряжение достигнет величины, при которой все ионы и электроны, создаваемые внешним ионизатором за 1 с, будут за это же время подходить к электродам. Максимальный ток I_{max} , соответствующий этому напряжению U_b , называется *током насыщения* (участок bc). Величина тока насыщения пропорциональна мощности ионизатора. При достаточно большом напряжении U_c начинается самоионизация газа, а при дальнейшем увеличении напряжения наступает самостоятельный газовый разряд. Участок кривой Od соответствует самостоятельному газовому разряду, а ветвь кривой, лежащая правее точки d , — самостоятельному газовому разряду.

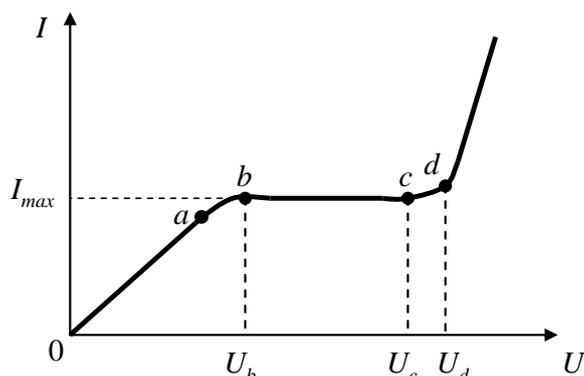


Рис. 67

Таковы общие черты газового разряда. Вместе с тем характер (тип) разряда существенно зависит от давления, температуры и химического состава газа, а также от материала, формы, размеров и взаимного расположения электродов.

Искровой разряд наблюдается, когда источник тока не способен поддерживать самостоятельный разряд в течение длительного времени (например, искры при расчесывании волос, разрядке конденсатора). Самые большие «искры» — молнии во время грозы. В облаке происходит разделение электрических зарядов. Физических механизмов такого разделения существует более десятка. Рассмотрим один из них — наиболее наглядный. Представим себе крупную водяную каплю, которая начинает падать сквозь облако. При этом она находится в электрическом поле «конденсатора» Земля — ионосфера. Это поле направлено вниз; оно поляризует каплю так, что ее верхняя часть оказывается заряженной отрицательно, а нижняя — положительно. На пути падающей капли встречаются тяжелые, а потому не слишком быстро движущиеся ионы — как положительные, так и отрицательные. Передняя (по движению) часть капли заряжена положительно, поэтому встретившиеся положительные ионы будут отброшены в сторону, тогда как отрицательные ионы, напротив, будут притянуты к капле.

Конечно, оказавшиеся позади падающей капли положительные ионы могут притянуться к ее отрицательной верхней части. Но капля падает быстро, а ионы не очень подвижны, поэтому многие ионы попросту не успевают догнать удаляющуюся от них каплю. В результате в процессе падения капля будет приобретать все больший отрицательный заряд. Поэтому в нижней части облака будет накапливаться отрицательный заряд. В то же время отброшенные в сторону положительные ионы будут снесены к верхушке облака восходящими потоками и увеличат ее положительный заряд.

Отрицательный заряд основания облака наводит положительный заряд на проводящей земной поверхности (рис. 68). Разность потенциалов между основанием облака на высоте 3—4 км и поверхностью Земли достигает 20—100 млн. вольт. Молния переносит из облака 20—30 Кл отрицательного электрического заряда, сила тока в молнии достигает 10—20 кА, длительность импульса тока в канале молнии несколько десятков микросекунд. Самостоятельный электрический разряд между грозовым облаком и Землей через некоторое время сам собою прекращается, так как большая часть избыточных электрических зарядов в грозовом облаке нейтрализуется электрическим током, протекающим по плазменному каналу молнии.

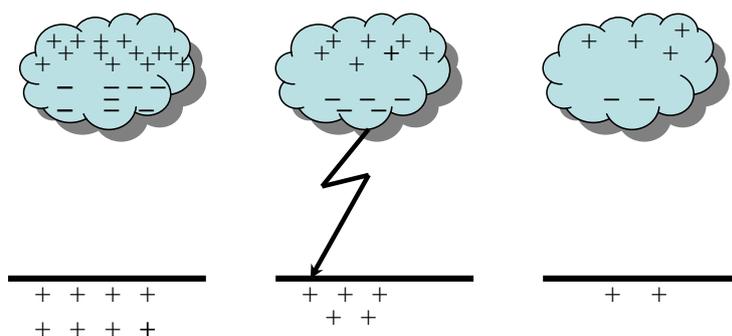


Рис. 68

При нарастании силы тока в канале молнии происходит нагревание плазмы до температуры свыше 10^4 К. Изменения давления в плазменном канале молнии при нарастании силы тока и прекращении разряда вызывают звуковые явления — гром.

Между отрицательно заряженной Землей и положительно заряженными верхними слоями атмосферы напряжение достигает примерно 40 кВ. В атмосферном воздухе всегда содержится небольшое количество ионов. Электрический ток, создаваемый этими ионами, разряжает Землю, но заряд пополняется с каждым ударом молнии. Если бы грозы прекратились по всей Земле (их ежедневно происходит около 300), то электрический заряд был бы нейтрализован током ионов в атмосферном воздухе примерно за полчаса. Молнии возникают не только в водяных облаках, но и в облаках пыли и газов, образующихся при извержении вулканов.

В сильно неоднородных электрических полях, образующихся, например, между острием и плоскостью или между проводом линии электропередач и поверхностью Земли, возникает особая форма самостоятельного разряда в газах, называемая *коронным* разрядом. Коронный разряд представляет собой слабое фиолетовое свечение газа, сопровождающееся легким шипением.

С коронным разрядом приходится считаться при передаче электроэнергии на большие расстояния. Наибольшая напряженность поля создается около проводов. Так как электроэнергия передается по сравнительно тонким проводам, то около последних происходит интенсивный коронный разряд. Это ведет к потере части передаваемой энергии. Для снижения потерь на коронный разряд провода делают не одиночными, а каждый из них расщепляют на несколько частей (проводов). Например, для ЛЭП с напряжением 500 кВ каждый провод расщепляют на три части. Эти части располагают так, чтобы сечения проводов вдоль линии находились в вершинах равностороннего треугольника. Расположенные таким образом части представляют собой как бы один пустотелый провод, но значительно большего радиуса кривизны.

Коронный разряд может быть успешно использован в электрофильтрах многих производств, где необходимо очищать газы, выходящие из топок, от твердых и жидких примесей.

Электрофильтр помещают внутри заводской трубы. Он состоит из металлического цилиндра, закрепленного на внутренней поверхности трубы (один из электродов), и тонкой проволоки, проходящей вдоль оси цилиндра (второй электрод). К электродам подводят высокое напряжение, которое у проволоки создает коронный разряд. Образовавшиеся при этом ионы, сталкиваясь с частицами дыма, под действием поля устремляются к цилиндру и оседают на нем.

Дуговой разряд возникает при сравнительно небольших напряжениях (около 60 В) между двумя близко расположенными друг от друга электродами (угольными или металлическими). При атмосферном давлении он имеет высокую температуру 5000—6000 К и сопровождается ослепительно ярким свечением. Дуговой разряд обусловлен в основном термоэлектронной эмиссией раскаленного катода. Этот вид разряда используется для сварки металлов (дуговая электросварка), выплавки специальных сталей (дуговая печь), освещения (дуговой фонарь, прожектор) и т.п.

Тлеющий разряд наблюдается в газе при низком давлении (около 13 Па) и большой напряженности электрического поля. Разряд имеет вид спокойно светящегося столба *A* (рис. 69), заполняющего почти все пространство между электродами газоразрядной трубки (положительный столб); не светящейся остается только небольшая область *B* около катода (катодное темное пространство). Свечение создают возбужденные молекулы; цвет свечения зависит от природы газа. Так, для неона характерно красное свечение; для аргона — сине-зеленое; пары ртути дают дневной свет. Тлеющий разряд используется в рекламных трубках.

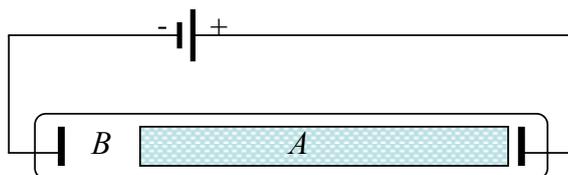


Рис. 69

Данный вид газового разряда вызван ударной ионизацией, производимой электронами, выбиваемыми из катода положительными ионами. Вблизи катода эти электроны еще только начинают ускоряться полем. Поэтому в области *B* они практически не производят ни ударной ионизации, ни даже возбуждения молекул газа, чем и объясняется отсутствие свечения в этой области. Достигая положительного столба *A*, электроны приобретают уже достаточную кинетическую энергию и поэтому ионизируют газ в этом столбе. Образующиеся при ударной ионизации положительные ионы устремляются к катоду и выбивают из него новые электроны, которые в свою очередь опять ионизируют газ в области *A*, и т.д. Таким образом непрерывно поддерживается тлеющий разряд.

§ 43. Электрический ток в вакууме

Откачивая газ из сосуда, можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы успевают пролетать от одной стенки сосуда к другой, ни разу не испытав соударений друг с другом. Такое состояние газа — *вакуум*.

Проводимость межэлектродного промежутка в вакууме можно обеспечить только с помощью введения в трубку источника заряженных частиц. Источником чаще всего является термоэлектронная эмиссия электронов с катода (испарение при высокой температуре). Испаряясь, электроны образуют вокруг горячего электрода электронное облако. Если данный электрод подключить к минусу источника, а холодный — к плюсу, то электроны покидают облако и устремляются к аноду. Цепь при этом замыкается, в ней устанавливается ток.

При противоположном подключении источника тока электрическое поле отталкивает электроны облака назад к горячему электроду. Цепь оказывается разомкнутой. Такая проводимость называется *односторонней*.

На явлении термоэлектронной эмиссии основана работа различных электронных ламп. Простейшей электронной лампой является *вакуумный диод*. Он представляет собой вакуумированный баллон из стекла или керамики, в котором находятся два электрода — анод и катод. Катод чаще всего покрывают оксидом щелочноземельных металлов. Такой слой при нагревании выделяет больше электронов, чем чистый металл. Условное изображение вакуумного диода в схемах показано на рисунке 70.

При высокой температуре нити накала (обычный режим работы ламп) эмиссия электронов велика и, следовательно, сила тока в цепи значительна. В этом случае сила тока зависит от напряжения так: пока напряжение мало, сила тока растет с увеличением анодного напряжения.

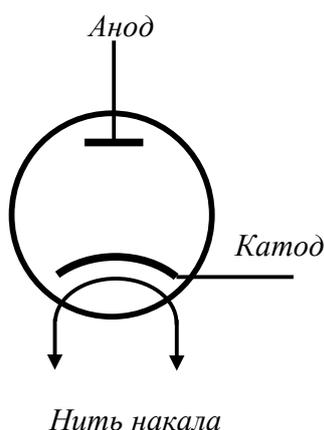


Рис. 70

Когда же анодное напряжение достигает некоторого значения, вполне определенного для данной температуры нити накала, сила тока перестает расти с увеличением напряжения: наступает явление насыщения тока. Вольтамперная характеристика вакуумного диода представлена на рисунке 71.

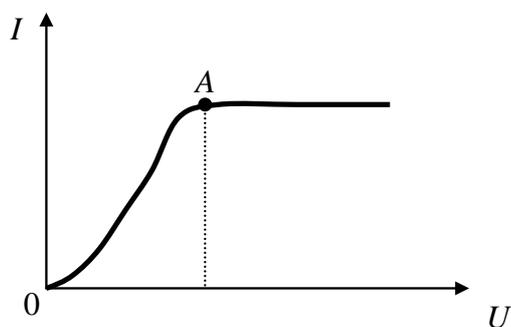


Рис. 71

Рассмотрим отдельные участки графика. Почему при малых напряжениях (участок OA) сила тока имеет значение меньшее, чем при насыщении? Ведь катод при данной температуре ежесекундно испускает одно и то же число электронов, независимо от приложенного напряжения. Почему же при малом напряжении не все они достигают анода? Это объясняется тем, что при большом числе испускаемых катодом электронов вылетевшие ранее электроны отталкивают те, которые следуют за ними. Поэтому часть электронов возвращается назад на катод, и вокруг катода имеется электронное облако.

По мере увеличения анодного напряжения все большее число вылетающих электронов может преодолеть силы отталкивания и достигнуть анода. Сила тока увеличивается, и электронное облако постепенно рассасывается. Начиная с некоторого значения напряжения, дальнейшее его увеличение уже не может вызвать роста силы тока: наступает насыщение. С повышением температуры катода ток насыщения возрастает, так как испаряется больше электронов.

Через диод ток может протекать только тогда, когда нить накала является катодом. При перемене полюсов источника тока ток в цепи прекращается. Это свойство диода широко используется в технике для выпрямления переменного тока.

Если в аноде 2 вакуумного диода сделать отверстие, то часть электронов, испущенных катодом 1, пролетит сквозь отверстие и образует в пространстве за анодом поток параллельно летящих электронов — электронный луч 5 (рис. 72).

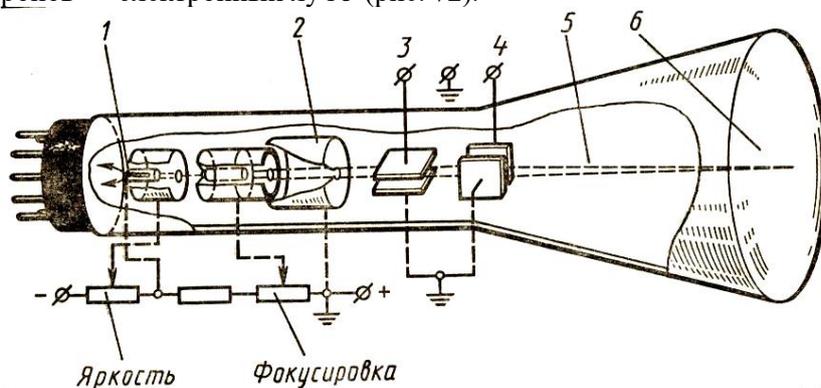


Рис. 72

Электронный прибор, в котором используется такой поток электронов, называется *электронно-лучевой трубкой*. Внутренняя поверхность стеклянного баллона электронно-лучевой трубки против анода покрыта тонким слоем кристаллов, способных светиться при попадании в них быстрых электронов. Эту часть трубки называют экраном (6).

С помощью электрических и магнитных полей можно управлять движением электронов на пути от анода до экрана и заставить электронный луч «рисовать» любую картину на экране. Эта способность электронного луча используется для создания изображений на экране электронно-лучевой трубки телевизора, называемой кинескопом. Изменение яркости свечения пятна на экране достигается путем управления интенсивностью пучка электронов с помощью дополнительного электрода, расположенного между катодом и анодом.

В трубке электронно-лучевого осциллографа между анодом и катодом расположены две пары параллельных металлических пластин. Эти пластины называются отклоняющими пластинами. Подача напряжения на вертикально расположенные пластины 4 вызывает смещение

электронного луча в горизонтальном направлении, подача напряжения на горизонтальные пластины Z вызывает вертикальное отклонение луча. Смещение луча на экране трубки пропорционально приложенному напряжению, поэтому электронный осциллограф может использоваться в качестве измерительного прибора.

Для исследования быстропеременных электрических процессов в осциллографе осуществляется развертка — равномерное перемещение электронного луча по горизонтали. Для того чтобы луч перемещался вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью, напряжение на горизонтальных отклоняющих пластинах должно изменяться линейно по времени, а для возвращения луча в исходное положение напряжение должно очень быстро падать до нуля. Такая форма напряжения носит название пилообразной (рис. 73).

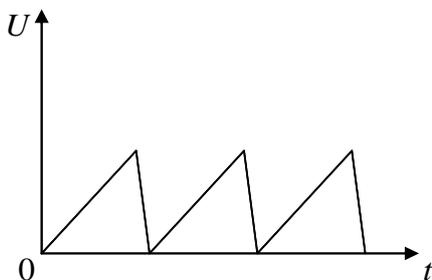


Рис. 73

§ 44. Электрический ток в полупроводниках

К полупроводникам относят твердые вещества, проводимость которых в сильной степени зависит от температуры и других внешних воздействий — облучения, давления и т.д. Полупроводниками являются многие химические элементы (B , Si , Ge , As , Te , I , Se и др.), большое количество соединений (Cu_2O , PbS и др.) и сплавов. Большинство окружающих нас в природе твердых тел — полупроводники.

Проводимость полупроводников обусловлена перемещением электронов; электрический ток не вызывает в них химических изменений и переноса вещества. В то время как у металлов удельное сопротивление с ростом температуры незначительно увеличивается, у полупроводников оно резко уменьшается по экспоненциальному закону. При высоких температурах полупроводники проводят ток почти так же хорошо, как металлы, а при низких они являются диэлектриками. Это объясняется тем, что концентрация свободных носителей заряда, сравнительно небольшая при обычных условиях, может в полупроводниках резко возрасти при внешних воздействиях.

Различают *собственную* и *примесную проводимости* полупроводников. Собственная проводимость характерна для чистых веществ, в которых нет примесей. Валентные электроны в структуре кристалла полупроводника связаны прочно, поэтому электронные связи между атомами легко могут нарушаться. Если такое нарушение происходит, то электрон связи становится электроном проводимости, а на его месте остается вакансия — дырка. Вакансия может быть заполнена электроном, перетянутым из другой связи (рекомбинация электрона и дырки); в этом случае получается эффект перемещения в новое положение. Такие перемещения могут быть хаотическими (в отсутствие электрического поля) или направленными (при наличии поля). Это позволяет рассматривать дырки как положительные носители заряда ($+e$). Однако истинными носителями заряда в полупроводниках являются электроны (свободные электроны и электроны связи). При наличии внешнего поля дырки перемещаются в направлении поля, а электроны — против поля. При этом создается электронно-дырочный ток, обуславливающий собственную проводимость полупроводника. Повышение температуры способствует разрыву новых связей и, следовательно, рождению новых носителей заряда, появляющихся попарно (электрон — дырка).

Собственная проводимость обусловлена дырками и электронами и сильно увеличивается с ростом температуры.

Появление чужеродных атомов примеси с иной валентностью, чем у атомов полупроводника, существенно увеличивает его проводимость. Дело в том, что атомы примеси сами становятся «поставщиками» свободных носителей заряда определенного знака. Если атом примеси имеет больше валентных электронов, чем требуется для его закрепления в кристалличес-

ской решетке полупроводника, то «лишние» электроны, не занятые в химической связи, становятся электронами проводимости, а сам атом примеси превращается в положительный ион. Если же число валентных электронов у атома примеси меньше, чем требуется для его закрепления в решетке, то недостающий для образования химической связи электрон заимствуется у соседних атомов. В итоге появляется подвижная дырка, а атом примеси становится отрицательным ионом. Примеси, «поставляющие» в качестве свободных носителей электроны, называются *донорными*, а примеси, вызывающие появление дырок, — *акцепторными*. Соответственно полупроводники с донорной примесью называются *электронными*, или полупроводниками *n*-типа (negative — отрицательный), а полупроводники с акцепторной примесью — *дырочными*, или полупроводниками *p*-типа (positive — положительный).

Наличие примеси в полупроводнике приводит к значительному повышению концентрации носителей определенного знака, называемых *основными*. Абсолютно чистых веществ нет, любой реальный полупроводник в зависимости от рода примеси является либо электронным, либо дырочным. При низких температурах преобладает примесная проводимость, а при более высоких — собственная.

Наиболее любопытные явления происходят при контакте полупроводников *n* и *p* типов. Эти явления используются в большинстве полупроводниковых приборов. Тонкий слой полупроводника, разграничивающий соседние его области с электронной и дырочной проводимостью (они создаются введением в кристалл различных примесей), называется *p–n-переходом*. Проводимость *p–n*-перехода зависит от направления тока: в одном направлении (проходном) она велика, а в обратном (запирающем) — мала.

Рассмотрим *p–n*-переход в отсутствие внешнего поля. Вследствие теплового движения свободные электроны диффундируют из *n*-области в *p*-область и там рекомбинируют с дырками, а дырки диффундируют из *p*-области в *n*-область и там рекомбинируют с электронами. В результате этих процессов оставшиеся в избытке заряды на границах *p–n*-перехода образуют двойной электрический слой (рис. 74, а), который создает контактное поле \vec{E}_k , выталкивающее электроны проводимости в глубь *n*-области, а дырки — в глубь *p*-области. В тонком слое *p–n*-перехода создается контактный скачок потенциала порядка 0,1 В. Такой потенциальный барьер при обычных температурах практически непроницаем для основных носителей; поэтому *p–n*-переход приобретает большое сопротивление и называется *запирающим слоем*.

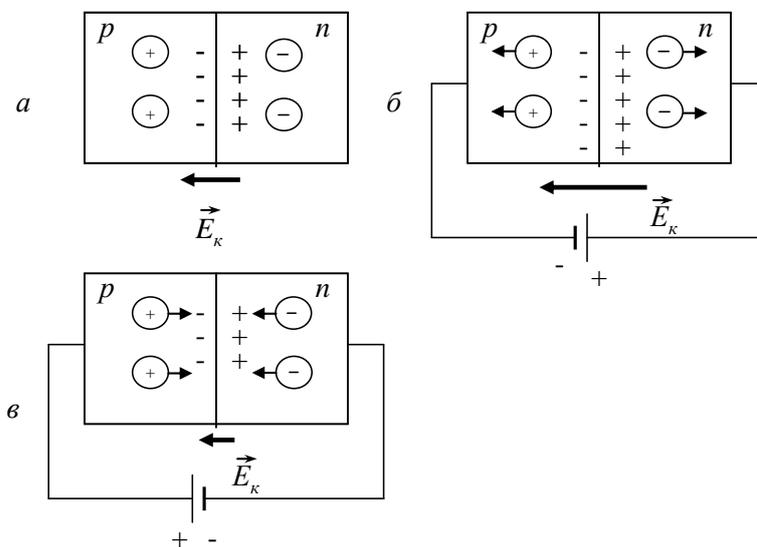


Рис. 74

Наложение внешнего поля \vec{E} , направленного от *n*-области к *p*-области (рис. 74, б), складывается с полем \vec{E}_k и еще больше обедняет *p–n*-переход основными носителями, увеличивая его толщину и уменьшая проводимость. В этих условиях ток основных носителей через контакт равен нулю. Будет проходить лишь очень малый ток неосновных носителей. Поэтому направление $n \rightarrow p$ является *запирающим*.

Наложение внешнего поля \vec{E} , направленного от p - к n -области (рис. 74, в), обогащает p - n -переход основными носителями, резко увеличивая его проводимость и сокращая толщину. Току p - n -переход оказывает малое сопротивление. Направление $p \rightarrow n$ является *проходным*. При наложении переменного напряжения ток будет проходить только в направлении $p \rightarrow n$. В этом состоит *вентильное* действие p - n -перехода.

Кристалл с p - n -переходом (диод) в цепи переменного тока (рис. 75) играет роль выпрямителя. Через нагрузочный резистор R идет ток одного направления. Из вольтамперной характеристики такого диода (рис. 76) видно, что закон Ома к p - n -переходу неприменим. Участок OA кривой соответствует току в проходном направлении, участок OB — весьма слабому току (за счет неосновных носителей) в обратном направлении. Полупроводниковые диоды широко применяются как выпрямители переменного тока.

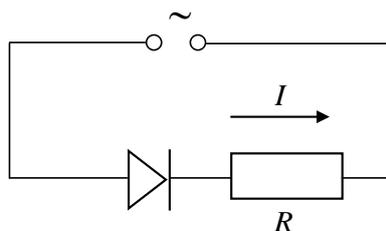


Рис. 75

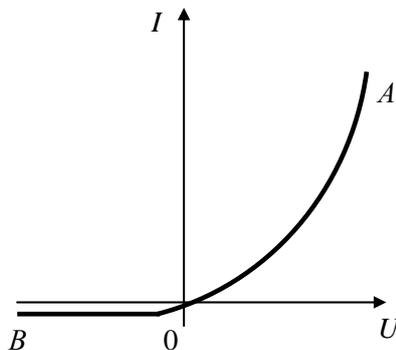


Рис. 76

Рассмотренные особенности p - n -перехода позволяют использовать его в полупроводниковых триодах (транзисторах), употребляемых для усиления электрических сигналов. Полупроводниковые диоды и триоды миниатюрны, надежны и удобны в работе, имеют большой срок службы. Их недостатком является увеличение обратного тока при повышении температуры, поэтому они работают в ограниченном интервале температур.

Однородный полупроводниковый резистор, сопротивление которого сильно зависит от температуры, называется *термистором*. Термисторы могут представлять собой полупроводниковые стерженьки, диски, бусинки с впаянными в них металлическими электродами. Их используют в качестве датчиков температуры в электрических термометрах сопротивления. Такие термометры очень чувствительны и могут реагировать на изменения температуры порядка 10^{-4} — 10^{-6} К. С их помощью можно регистрировать различие температур разных участков тела животных или растений, колебания температуры в ходе химических реакций.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Для осмысления и систематизации материала данной главы предлагаем Вам воспользоваться приемами технологии развития критического мышления (<http://culture.16mb.com/page/02/trkm.pdf>). Начните с чтения параграфов с разметкой (прием «ИНСЕРТ») (там же, с. 33—34). Особое внимание обратите на фрагменты, которые Вы поместили знаком «?». Попытайтесь разрешить возникшие противоречия; с вопросами, оставшимися без ответов, обратитесь к преподавателю.

Затем представьте материал главы в кластерах (там же, с. 32—33 и 66—68). Для этого выделите смысловые единицы темы и графически оформите их в определенном порядке.

2. Ознакомьтесь с содержанием фильма об искровом разряде в природе «Созданные разрушать. Молния» (<http://filmix.net/dokumentalenyje/25456-sozdannye-razrushat-molniya-built-for-destruction-lightning-2008.html>). Составьте аннотацию фильма, которая позволяла бы зрителю при предварительном знакомстве с фильмом сделать вывод о его содержании и структуре, понять, окажется ли он полезным для углубления знаний в интересующей области. Напомним, что в аннотации содержание первоисточника должно быть передано лаконично и емко, в форме связного текста. Средний объем аннотации — не более 1 страницы.

§ 45. Гармонические колебания и их характеристики

Колебаниями называются процессы, характерной особенностью которых является *повторяемость*. Это могут быть качания маятников и сооружений, тепловые колебания ионов в кристаллической решетке, ритмичные сокращения сердца и т.п. Колебания любой природы подчиняются общим законам. Особое значение имеют *периодические колебания*, в процессе которых система возвращается в исходное состояние через равные промежутки времени T . Длительность этих промежутков времени называется *периодом колебания*. Величина

$$\nu = \frac{1}{T},$$

показывающая, сколько раз в секунду повторяется колебание, называется *частотой* и измеряется в герцах:

$$1 \text{ Гц} = 1 \frac{1}{\text{с}}.$$

Перечислим примеры периодических процессов в биологии: многие цветы закрывают венчики с наступлением темноты; у большинства животных наблюдается годовая периодичность появления потомства; известно периодическое изменение интенсивности фотосинтеза у растений, колебания испытывают размеры ядер в клетках, численность животных определенного вида, проживающих в данном районе, и т.д.

Простейшими колебаниями являются *гармонические*, происходящие по закону косинуса (или синуса):

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где x — величина, периодически меняющаяся во времени, A — модуль ее максимального значения (*амплитуда*), t — время, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — *циклическая частота*; величина

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$$

называется *фазой колебания*, а φ_0 — *начальной фазой колебания*. За время, равное периоду, фаза колебания изменяется на 2π .

Физическая система, совершающая колебания около положения равновесия, называется *осциллятором*. Простейший гармонический осциллятор — материальная точка, совершающая гармонические колебания вдоль прямой.

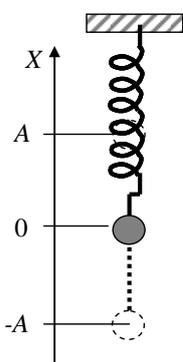


Рис. 77

Гармонические колебания совершает, например, груз, подвешенный на невесомой пружине (рис. 77).

Его движение можно свести к движению материальной точки — центра масс груза. В этом случае x — смещение точки от положения равновесия.

Скорость и ускорение гармонического осциллятора можно найти, взяв первую, а затем вторую производную от x по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}).$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi).$$

Здесь $A\omega_0 = v_{\max}$ — амплитуда скорости точки и $A\omega_0^2 = a_{\max}$ — амплитуда ускорения. Величины x , v , a изменяются гармонически во времени с одинаковой частотой, но сдвинуты друг относительно друга по фазе: скорость опережает смещение на $\pi/2$, а ускорение опережает смещение на π (рис. 78).

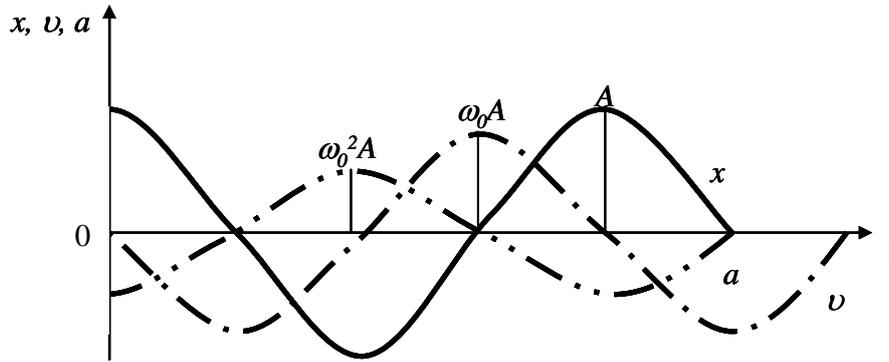


Рис. 78

Сопоставив выражения для x и a , заметим, что

$$a = -\omega_0^2 x.$$

Отсюда можно получить выражение для силы, вызывающей и поддерживающей гармонические колебания:

$$F = ma = -m\omega_0^2 x = -kx,$$

где $k = m\omega_0^2$. Эта сила пропорциональна смещению и всегда направлена к положению равновесия. Такой силой является, в частности, сила упругости. Силы, неупругие по природе, но удовлетворяющие условию

$$F = -kx,$$

называются квазиупругими. Тело может совершать гармонические колебания, если на него действует упругая или квазиупругая сила.

Колебания системы, выведенной из положения равновесия и далее предоставленной самой себе, называются *свободными*. Подставив во второй закон Ньютона выражение для квазиупругой силы, получим:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx,$$

или

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

Это уравнение свободных колебаний гармонического осциллятора. Здесь

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

есть *собственная частота* колебательной системы. Период свободных колебаний выражается следующим образом:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Замечательной особенностью гармонических свободных колебаний является независимость их частоты от амплитуды. Частота определяется только свойствами самой системы.

При гармонических колебаниях материальной точки периодически происходят взаимные превращения кинетической и потенциальной энергии.

Величина полной энергии гармонического осциллятора массой m в любой момент времени равна сумме этих энергий:

$$E = E_p + E_k,$$

или

$$E = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

Учитывая, что $k = m\omega_0^2$ и подставив выражения для x и v , получим:

$$E = \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} mA^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{mA^2 \omega_0^2}{2}.$$

В случае свободных колебаний полная энергия остается постоянной.

В реальных системах, однако, всегда имеются силы сопротивления, приводящие к рассеянию энергии. Колебания затухают (рис. 79).

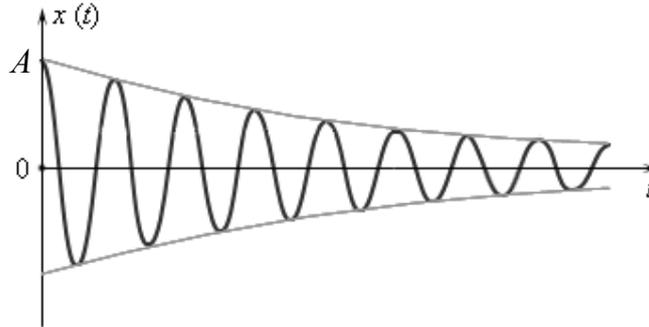


Рис. 79

§ 46. Вынужденные колебания. Резонанс

Если на колебательную систему действует внешняя периодическая сила $F_{\max} \cos \omega t$, то в системе через некоторое время установятся *вынужденные колебания* с частотой, равной частоте ω колебаний внешней силы.

Второй закон Ньютона для такой системы запишется так:

$$ma = -kx + F_{\max} \cos \omega t.$$

Учитывая, что $a = -\omega^2 x$ и $k = m\omega_0^2$, получим:

$$-m\omega^2 x + m\omega_0^2 x = F_{\max} \cos \omega t,$$

откуда

$$x = \frac{F_{\max}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t.$$

Отсюда видно, что вынужденные колебания являются гармоническими. Их амплитуда

$$A = \frac{F_{\max}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

зависит от того, насколько собственная частота системы отличается от частоты колебаний внешней силы. При приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте системы амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Это явление называется *резонансом*. В приведенном рассмотрении не учитывалась сила трения. Поэтому амплитуда при резонансе неограниченно увеличивается. В реальных же колебательных системах (с затуханием) амплитуда при резонансе достигает максимальных, но конечных значений. Строго говоря, в таких системах резонанс наступает при частоте немного меньшей, чем ω_0 (трение «замедляет» колебания). На рисунке 80 показан вид резонансных кривых (зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты) для систем без затухания (1), с малым затуханием (2), большими затуханиями (3) и (4).

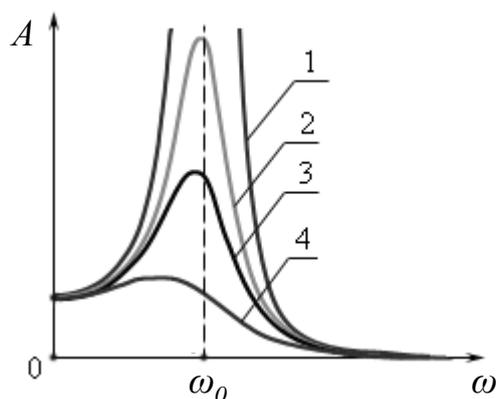


Рис. 80

§ 47. Сложение гармонических колебаний

Одна и та же материальная точка может участвовать одновременно в двух или более колебаниях. Нахождение закона результирующего колебательного движения называется *сложением колебаний*. Рассмотрим несколько простых случаев сложения гармонических колебаний.

1. Сложение двух гармонических колебаний *одного направления* с равными частотами ω , одинаковыми амплитудами A и разностью фаз $\Delta\varphi$:

$$x_1 = A \cos \omega t; \quad x_2 = A \cos(\omega t + \Delta\varphi);$$

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos \frac{\Delta\varphi}{2} \cos\left(\omega t + \frac{\Delta\varphi}{2}\right).$$

Результирующее колебание является также гармоническим и имеет частоту ω . Его амплитуда

$$A_{рез} = 2A \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

зависит от разности фаз $\Delta\varphi$ слагаемых колебаний. При $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$ амплитуда максимальна ($A_{рез} = 2A$) — складывающиеся колебания друг друга усиливают.

При $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi$ колебания складываются «в противофазе» и взаимно друг друга гасят ($A_{рез} = 0$). В случае когда амплитуды A_1 и A_2 слагаемых колебаний неодинаковы, $A_{рез} = A_1 + A_2$ при $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$ и $A_{рез} = |A_1 - A_2|$ при $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi$.

2. Сложение *взаимно перпендикулярных* колебаний. Если частоты слагаемых колебаний относятся как целые числа, то точка описывает сложные замкнутые кривые — фигуры Лиссажу, форма которых зависит от соотношения частот и разности фаз исходных колебаний. Фигуры Лиссажу можно наблюдать на экране осциллографа, заставив электронный луч колебаться во взаимно перпендикулярных направлениях. Если частоты двух колебаний одинаковы, а их фазы отличаются на $\pi/2$:

$$x = A_1 \cos \omega t; \quad y = A_2 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = A_2 \sin \omega t,$$

то результирующее движение точки происходит по плоской траектории, уравнение которой

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1.$$

Эта траектория — эллипс, оси которого совпадают с осями x и y (рис. 81). Форма и расположение эллипса могут меняться с изменением разности фаз исходных колебаний (рис. 82). Он, в частности, может вырождаться в прямую.

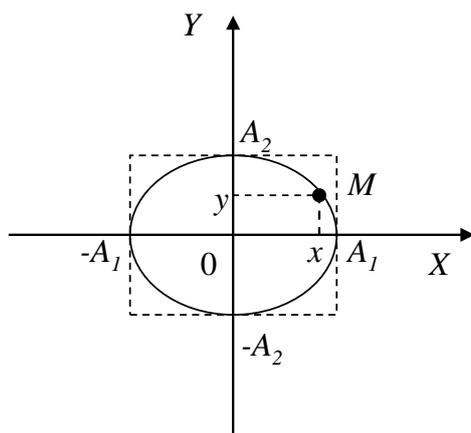


Рис. 81

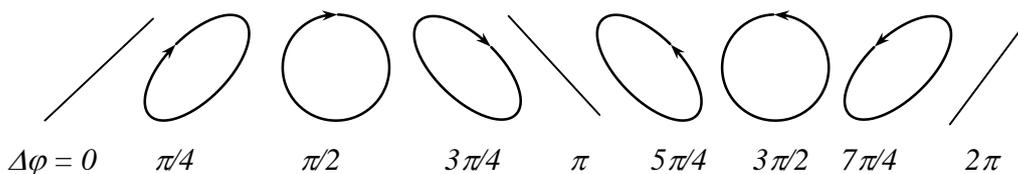


Рис. 82

§ 48. Волны в упругих средах

Колебания, возникнув в одном месте упругой среды, передаются соседним частицам за счет взаимодействия с ними и распространяются с некоторой скоростью. Процесс распространения колебаний в среде называется *волной*. Линия, указывающая направление распространения волны, называется *лучом*. Если колебания частиц среды происходят перпендикулярно лучу, то волна является *поперечной*. Если же частицы колеблются вдоль луча, то волна называется *продольной*. В упругой среде возникают и распространяются деформации сжатия-разрежения (продольные волны) или деформации сдвига (поперечные волны). Длиной волны называется расстояние между точками, колеблющимися с разностью фаз 2π . За время, равное периоду T колебаний частиц, фронт волны перемещается в однородной среде на расстояние, равное λ :

$$\lambda = \nu T, \text{ или } \lambda = \frac{\nu}{\nu},$$

где ν — частота колебаний частиц.

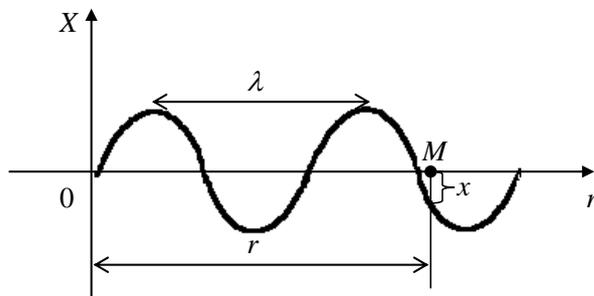


Рис. 83

Рассмотрим особенности волнового процесса на примере упругой поперечной волны (рис. 83). Пусть колебания источника волны в точке O являются гармоническими:

$$x = A \cos \omega t.$$

Тогда до некоторой произвольной точки M с координатой r колебания от источника дойдут с запозданием — через время $\tau = \frac{r}{v}$. Поэтому ее колебания отстают по фазе от колебаний источника:

$$x = A \cos \omega(t - \tau) = A \cos \omega(t - \frac{r}{v}).$$

Это уравнение *плоской бегущей волны*, описывающее колебания любой точки в любой момент времени. Зависимость аргумента от координаты и времени — признак волнового процесса.

В волновом процессе частицы среды не перемещаются, они только колеблются около положения равновесия; со скоростью волны распространяются лишь колебания, переносящие энергию.

Волна, характеризуемая одной частотой, называется *монохроматической*.

Волна называется *плоскополяризованной*, если колебания частиц происходят в определенной плоскости. Поляризованными могут быть только поперечные волны.

§ 49. Интерференция и дифракция волн

Интерференция — это наложение двух или нескольких волн, приводящее к устойчивому во времени усилению колебаний в одних точках пространства и ослаблению — в других.

Интерферировать могут только *когерентные* волны — это волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз. Амплитуда результирующего колебания равна нулю в тех точках пространства, в которые волны с одинаковыми амплитудами и частотой приходят со сдвигом по фазе колебаний на π или на половину периода колебаний. При одинаковом законе колебаний двух источников волн различие на половину периода колебаний будет при условии, что разность Δl (разность хода интерферирующих волн) расстояний l_1 и l_2 от источников волн до этой точки равна половине длины волны:

$$\Delta l = l_1 - l_2 = \frac{\lambda}{2}$$

или нечетному числу полуволен (рис. 84, а):

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Это условие интерференционного минимума.

Интерференционные максимумы наблюдаются в точках пространства, в которые волны приходят с одинаковой фазой колебаний (рис. 84, б). При одинаковом законе колебаний двух источников для выполнения этого условия разность хода Δl должна равняться целому числу волн:

$$\Delta l = k\lambda.$$

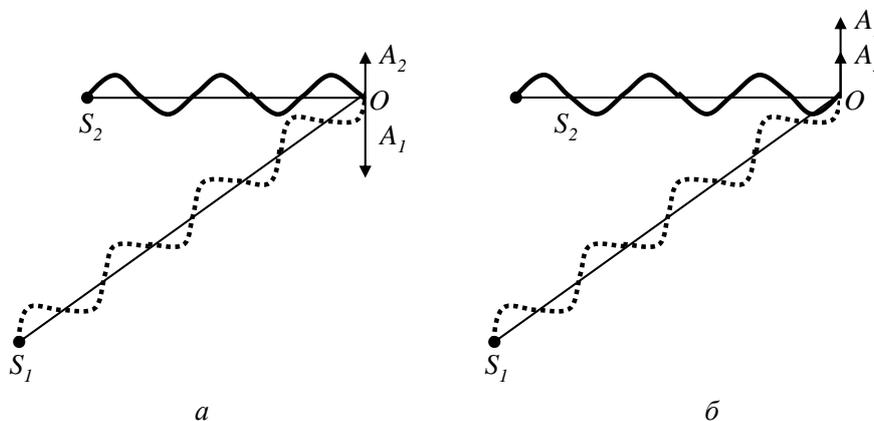


Рис. 84

Куда исчезает энергия двух волн в местах интерференционных минимумов? Если рассматривать только одно место встречи двух волн, то на такой вопрос нельзя дать правильный ответ. Распространение волн не является совокупностью независимых процессов колебаний в отдельных точках пространства. Сущность волнового процесса заключается в передаче энергии колебаний от одной точки пространства к другой и т.д. При интерференции волн в местах интерференционных минимумов энергия результирующих колебаний действительно меньше суммы энергий двух интерферирующих волн. Зато в местах интерференционных максимумов энергия результирующих колебаний превышает сумму энергий интерферирующих волн ровно на столько, на сколько уменьшилась энергия в местах интерференционных минимумов. При интерференции волн энергия колебаний перераспределяется в пространстве, но при этом закон сохранения энергии выполняется.

Отклонение направления распространения волн от прямолинейного у границы преграды называется *дифракцией волн*. Дифракция волн происходит при встрече с преградой любой формы и любых размеров. Обычно при больших по сравнению с длиной волны размерах препятствия или отверстия в преграде дифракция волн мало заметна. Наиболее отчетливо дифракция проявляется при прохождении волн через отверстие с размерами порядка длины волны или при встрече с препятствиями таких же размеров. При достаточно больших расстояниях между источником волн, преградой и местом наблюдения волн дифракционные явления могут иметь место и при больших размерах отверстия или преграды.

Причиной дифракции является интерференция. Это объясняется *принципом Гюйгенса — Френеля*: каждая точка среды, до которой дошла волна, становится источником вторичных волн, которые интерферируют в следующих точках пространства.

§ 50. Стоячие волны

Пусть волна бежит вдоль оси абсцисс, доходит до препятствия, расположенного в начале координат, и без потерь энергии начинает двигаться вдоль оси абсцисс справа налево, встречаясь и складываясь с волной, бегущей слева направо. Здесь возможны два случая.

1. Волна отражается в точке O в той же фазе, в которой она к ней пришла (рис. 85, *а*). В этом случае уравнение бегущей слева направо волны имеет вид

$$x = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right),$$

а для отраженной волны уравнение запишется так:

$$x_{\text{отр}} = A \cos \omega \left(t + \frac{r}{v} \right).$$

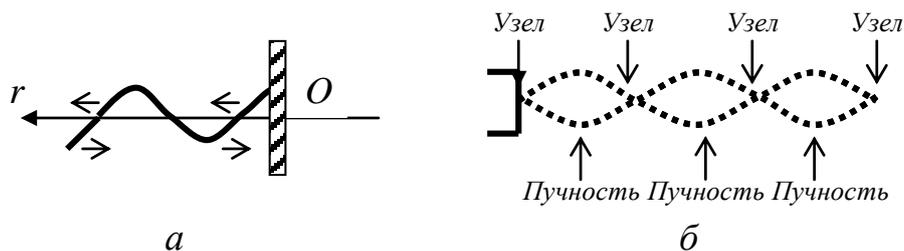


Рис. 85

Сложив оба уравнения, получим:

$$x = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) + A \cos \omega \left(t + \frac{r}{v} \right).$$

Преобразовав сумму косинусов в произведение, получим

$$x = 2A \cos \omega \frac{r}{v} \cdot \cos \omega t = D \cos \omega t.$$

Здесь величина $D = \left| 2A \cos \omega \frac{r}{v} \right|$ не зависит от времени, следовательно, это амплитуда но-

вого колебания всех точек волны. Выражение же, стоящее под знаком косинуса во втором множителе, не зависит от координаты.

Итак, в результате сложения бегущей и отраженной волн мы получили новую волну, у которой фаза не зависит от координаты, зато от координаты зависит амплитуда колебаний. Такая волна называется *стоячей волной*.

У стоячей волны есть точки, где амплитуда колебаний равна нулю. Эти точки называются *узлами* стоячей волны (рис. 85, б). Найдем их координаты, полагая $D = \left| 2A \cos \frac{2\pi r}{\lambda} \right| = 0$.

Но косинус равен нулю, если его аргумент равен нечетному числу $\pi/2$, следовательно,

$$\frac{2\pi r}{\lambda} = (2k + 1) \frac{\pi}{2},$$

откуда получаем, что координаты узлов определяются из условия

$$r_{уз} = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}.$$

У стоячей волны есть такие точки, где амплитуда стоячей волны вдвое больше амплитуды бегущей волны. Эти точки называются *пучностями* стоячей волны. Очевидно, что мы получим координаты пучностей, положив $\cos \frac{2\pi r}{\lambda} = \pm 1$, для чего необходимо, чтобы выполнялось

условие $\frac{2\pi r}{\lambda} = k\pi$, откуда следует, что координаты пучностей удовлетворяют соотношению:

$$r_{пуч} = 2k \frac{\lambda}{4}.$$

2. Волна отражается в точке O в противоположной фазе по сравнению с бегущей волной (рис. 86). В этом случае уравнение волны, бегущей слева направо, запишется в прежнем виде, а уравнение отраженной волны примет вид:

$$x_{отп} = A \cos \omega \left(t + \frac{r}{v} + \pi \right).$$

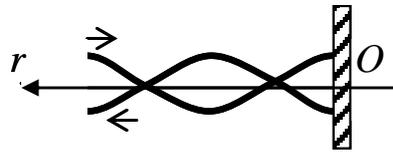


Рис. 86

Сложив оба уравнения волны, получим вновь уравнение стоячей волны, в чем читатель сам легко убедится. Но амплитуда стоячей волны в этом случае будет иметь вид:

$$D = \left| 2A \sin \frac{2\pi r}{\lambda} \right|.$$

Нетрудно отсюда получить, что в данном случае вместо узлов возникнут пучности, а вместо пучностей — узлы стоячей волны.

§ 51. Звуковые волны

Раздел физики, занимающийся изучением звуковых явлений, называется *акустикой*, а явления, связанные с возникновением и распространением звуковых волн, — *акустическими явлениями*.

Процесс распространения сжатия или разрежения в газе происходит в результате столкновений молекул газа, поэтому скорость звука в газе примерно равна скорости движения молекул. Средняя скорость теплового движения молекул уменьшается с понижением температуры газа, поэтому уменьшается с понижением температуры газа и скорость распространения звука. Например, в водороде при понижении температуры от 300 до 17 К скорость звука уменьшается от 1300 до 320 м/с. По современным измерениям скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна 331 м/с.

Связь между атомами и молекулами в жидкостях и твердых телах значительно более жесткая, чем в газах. Поэтому скорость распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах значительно больше скорости звука в газах. Так, скорость звука в воде равна 1500 м/с, а в стали — 6000 м/с.

Любые звуки человек характеризует в соответствии со своим восприятием по уровню громкости.

Сила воздействия звуковой волны на барабанную перепонку человеческого уха зависит от звукового давления. *Звуковое давление* — это дополнительное давление, возникающее в газе или жидкости при прохождении звуковой волны. Нижняя граница ощущения звука человеческим ухом соответствует звуковому давлению примерно 10^{-5} Па. Верхняя граница звукового давления, при достижении которой возникает ощущение боли в ушах, равна примерно 100 Па. Звуковые волны с большой амплитудой изменения звукового давления воспринимаются человеческим ухом как громкие звуки, с малой амплитудой изменения звукового давления — как тихие звуки.

Звуковые колебания, происходящие по гармоническому закону, воспринимаются человеком как определенный *музыкальный тон*. Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки *высокого тона*, звуки низкой частоты — как звуки *низкого тона*. Диапазон звуковых колебаний, соответствующий изменению частоты звуковых колебаний в два раза, называется октавой.

Звуковые колебания, не подчиняющиеся гармоническому закону, воспринимаются человеком как сложный звук, обладающий *тембром*. При одной высоте тона звуки, издаваемые, например, скрипкой и пианино, отличаются тембром.

Диапазон частот звуковых колебаний, воспринимаемых человеческим ухом, лежит в пределах примерно от 20 до 20000 Гц. Продольные волны в среде с частотой изменения давления менее 20 Гц называются *инфразвуком*, с частотой более 20000 Гц — *ультразвуком*.

Ультразвук действует на биологические объекты. При малых интенсивностях он активизирует процессы обмена, повышает проницаемость клеточных мембран, производит микро-массаж тканей. При больших интенсивностях разрушает эритроциты, вызывает нарушение функций и гибель микроорганизмов, мелких животных. Разрушая ультразвуком оболочки растительных и животных клеток, извлекают из них биологически активные вещества (ферменты, токсины). В хирургии ультразвук используется для разрушения злокачественных опухолей, распиливания костей и т.д.

Ультразвук издают и воспринимают многие животные. Например, собаки, кошки, мыши слышат ультразвуки с частотой до 100 кГц. Чувствительны к ним и многие насекомые. Некоторые животные используют ультразвук для ориентации в пространстве (ультразвуковая локация). Летучая мышь периодически испускает короткие ультразвуковые сигналы (30—120 кГц) в направлении полета. Улавливая отраженные от предметов сигналы, животное определяет положение предмета и оценивает расстояние до него. Этот способ локации используют также дельфины, которые свободно ориентируются в мутной воде, в темноте. Использование для эхолокации именно ультразвука вполне естественно. Чем меньше длина волны излучения, тем более мелкими могут быть объекты, которые необходимо опознать. В данном случае линейные размеры объекта должны быть больше или, по крайней мере, порядка длины волны звука. Так, частоте 80 кГц отвечает длина волны, равная 4 мм. Кроме того, с уменьшением длины волны легче реализуется направленность излучения, а это очень важно для эхолокации.

Человек использует ультразвуковую локацию для изучения рельефа морского дна, обнаружения косяков рыбы, айсбергов. В медицине ультразвуковая диагностика применяется, например, для определения опухолей на внутренних органах.

Инфразвуки — низкочастотные упругие волны — сопровождают человека в повседневной жизни. Мощными источниками инфразвука являются грозовые разряды (гром), оружейные выстрелы, взрывы, обвалы, штормы, работа машин, городской транспорт. Постоянно действующие мощные инфразвуки определенных частот (3—10 Гц) вредны для здоровья человека, они могут вызвать ухудшение зрения, нервные расстройства, резонансные колебания внутренних органов, потерю памяти.

Особенность инфразвуков — слабое поглощение их веществом, поэтому они легко проходят сквозь препятствия и могут распространяться на очень большие расстояния. Это позволяет, например, предсказать приближение стихийного бедствия — шторма, цунами. Многие

рыбы, морские млекопитающие и птицы, по-видимому, воспринимают инфразвуки, так как реагируют на приближение шторма.

Звуковые волны, встречаясь с любым телом, вызывают вынужденные колебания. Если частота собственных свободных колебаний тела совпадает с частотой звуковой волны, то условия для передачи энергии от звуковой волны телу оказываются наилучшими — тело является акустическим резонатором. Амплитуда вынужденных колебаний при этом достигает максимального значения — наблюдается *акустический резонанс*.

Акустическими резонаторами являются, например, трубы духовых инструментов. В этом случае в качестве тела, испытывающего резонансное колебание, выступает воздух в трубе. Способность уха различать звуки по высоте и тембру связана с резонансными явлениями, происходящими в основной мембране. Действуя на основную мембрану, звуковая волна вызывает в ней резонансные колебания определенных волокон, собственная частота которых соответствует частотам гармонического спектра данного колебания. Нервные клетки, связанные с этими волокнами, возбуждаются и посылают нервные импульсы в центральный отдел слухового анализатора, где они, суммируясь, вызывают ощущение высоты и тембра звука.

§ 52. Световые волны

В световой волне совершают быстрые ($\nu = 10^{14}$ Гц) непрерывные колебания векторы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Их колебания взаимосвязаны и происходят в направлениях, перпендикулярных лучу (световая волна — поперечная), причем так, что векторы напряженности и индукции взаимно перпендикулярны (рис. 87).

Как показывают опыты, действие света на глаз и другие приемники обусловлено колебаниями электрического вектора \vec{E} , называемого, поэтому, *световым*. Для плоской синусоидальной волны, распространяющейся со скоростью v в направлении r , колебания светового вектора описываются уравнением

$$E = E_{\max} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right).$$

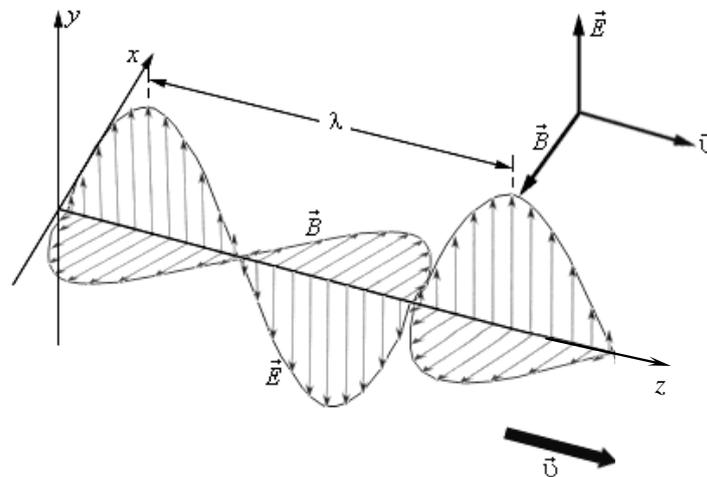


Рис. 87

Свет, имеющий определенную частоту (или длину волны), называется *монохроматическим*. Если колебания светового вектора происходят только в одной проходящей через луч плоскости, то свет называют *плоскополяризованным*. Естественный свет содержит колебания \vec{E} по всем направлениям.

При переходе света из одной среды в другую его частота остается неизменной, а соответствующая ей длина волны меняется, так как скорость света в разных средах различна. Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Когерентные световые волны (как и волны любой другой природы) *интерферируют*. Причем независимые источники света (за исключением лазеров) не могут быть когерентными, ибо в каждом из них свет испускается множеством атомов, излучающих несогласованно.

Когерентность можно обеспечить, разделив волну от одного источника на две части и затем сведя их вместе. Излученные одной группой атомов, полученные таким образом две волны будут когерентны и при наложении могут интерферировать. На практике разделение одной волны на две можно осуществить разными способами. В установке, предложенной Т. Юнгом, белый свет проходит через узкое отверстие S (рис. 88, *а*), затем с помощью двух отверстий S_1 и S_2 пучок разделяется на два. Эти два пучка, накладываясь друг на друга, образуют в центре экрана белую полосу, а по краям — радужные.

Интерференцией света объясняется окраска мыльных пузырей и тонких масляных пленок на воде. Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее. На второй границе пленки вновь происходит отражение волн (рис. 88, *б*). Световые волны, отраженные двумя поверхностями тонкой пленки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода, кратной целому числу длин волн:

$$\Delta l = k\lambda,$$

наблюдается интерференционный максимум.

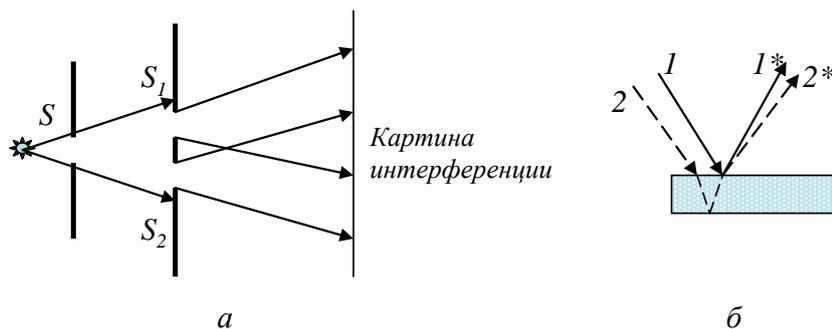


Рис. 88

При разности, кратной нечетному числу полуволн:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

наблюдается интерференционный минимум. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется, и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны.

Яркую, переливающуюся всеми цветами радуги окраску некоторых раковин (перламутр), перьев птиц, на поверхности которых расположены тончайшие, незаметные для глаза прозрачные чешуйки, также можно объяснить интерференцией.

Интерференционные методы нашли широкое применение в ряде областей науки и техники. Картина интерференции очень чувствительна к факторам, изменяющим разность хода лучей. На этом основано высокоточное измерение длин, плотностей, показателей преломления, качества полировки поверхностей и т.д. Одно из применений — просветление оптики. Для уменьшения света, отраженного поверхностями стеклянных оптических приборов (например, линз), на эти поверхности наносится специальная прозрачная тончайшая пленка. Толщина ее подбирается так, чтобы отражающиеся от обеих поверхностей лучи определенной длины волны в основном гасились за счет интерференции. Без пленки на каждой линзе теряется до 10% энергии света.

Явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении у края преграды называется *дифракцией света*. Вследствие малой длины волны света дифракционная картина четкая, если преграды или отверстия имеют малый размер (сравнимый с длиной волны). Дифракция света всегда сопровождается интерференцией (принцип Гюйгенса — Френеля). На основании этого можно получить при освещении непрозрачного диска на экране в центре его тени светлое пятно, а от круглого отверстия — в центре темное пятно. Картина дифракции в белом свете — цветная.

Явление дифракции света используется в спектральных приборах. Одним из основных элементов таких приборов является *дифракционная решетка*. Дифракционная решетка представляет собой совокупность параллельных узких прозрачных для света щелей, разделенных

непрозрачными промежутками (рис. 89). Лучшие решетки имеют до 2000 штрихов на 1 мм поверхности. При этом общая длина решетки 100—150 мм. Такие решетки обычно получают нанесением на стеклянную пластину с помощью специальных машин ряда параллельных штрихов — царапин. Неповрежденные участки играют роль щелей, а царапины, рассеивающие свет, играют роль непрозрачных промежутков. Если непрозрачные штрихи (царапины) нанести на полированную металлическую поверхность, то получится так называемая отражательная дифракционная решетка. Сумма c ширины a щели и промежутка b между щелями называется периодом, или постоянной, решетки:

$$c = a + b .$$

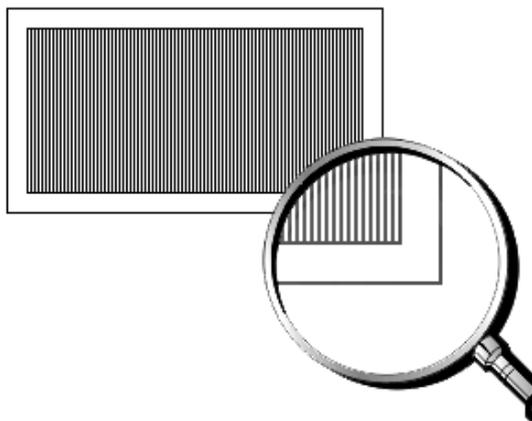


Рис. 89

Рассмотрим основные моменты элементарной теории дифракционной решетки. Пусть на решетку падает плоская монохроматическая волна длины λ (рис. 90). Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим для этого волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ . Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC :

$$|AC| = |AB| \sin \varphi = c \sin \varphi .$$

Максимумы будут наблюдаться под углом φ , определяемым условием

$$c \sin \varphi = k \lambda ,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ Эти максимумы называются главными.

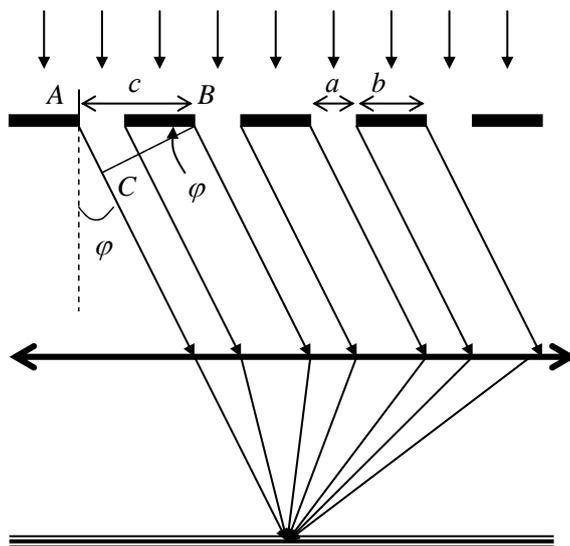


Рис. 90

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия максимумов усиливаются не только волны, идущие от левых (по рисунку) краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели на расстоянии s . Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

За решеткой помещается собирающая линза, в фокальной плоскости которой расположен экран. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке, в которой и происходит сложение волн и их взаимное усиление.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то *решетка разлагает белый свет в спектр* (рис. 91). Чем больше λ , тем дальше располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны, от центрального максимума. Каждому значению k соответствует свой спектр.

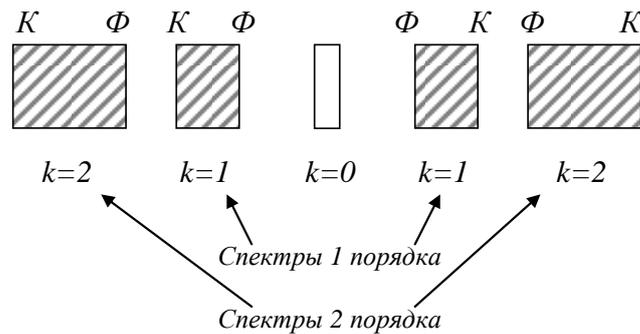


Рис. 91

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период решетки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла φ , соответствующего направлению на максимум.

Если рассматривать под микроскопом крылья бабочек, то можно заметить, что они состоят из большого числа элементов, размер которых имеет порядок величины длины волны видимого света. Таким образом, крыло бабочки представляет собой своеобразную дифракционную решетку. Радужная полоска видна и в глазах стрекоз и других насекомых. Она образуется благодаря тому, что их сложные глаза состоят из большого числа отдельных «глазков» — фасеток, т.е. тоже являются «живыми» дифракционными решетками.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Составьте терминологический словарь по теме «Гармонические колебания и их характеристики».
2. Чем отличаются вынужденные колебания от свободных? Какова причина резонанса? Как зависит высота резонансного пика от величины силы трения?
3. Какие колебания возникают при сложении нескольких гармонических колебаний? В чем заключается принцип суперпозиции колебаний?
4. Что такое механическая волна? Что является источником механических волн? В каких средах могут распространяться поперечные волны? Продольные? Ответ обоснуйте. Что такое интерференция волн?
5. Что такое звуковые волны? Может ли звук распространяться в пустоте? Чему равна скорость звука в различных средах? Чем определяется высота и громкость звука?
6. Используя интернет-ресурсы, подготовьте сообщение на тему «Природные сонары».
7. В чем состоят основные положения электромагнитной природы света? Почему интерференция считается одним из основных доказательств волновой природы света? В чем заключается явление дифракции света?
8. Каков принцип действия дифракционной решетки? Как зависит спектр, получаемый с помощью дифракционной решетки, от постоянной решетки? От числа штрихов на решетке?
9. Просмотрите фильм «Пределы света. Что такое свет и цвет?» (<https://www.youtube.com/watch?v=eIPqILHQkR0>). Составьте по содержанию фильма вопросы в рамках темы «Шкала электромагнитных волн», которые требуют от отвечающего развернутого ответа. Количество вопросов — не менее десяти.

§ 53. Законы геометрической оптики

При решении многих задач оптики можно отвлечься от волновой природы света. Если размеры отверстий и препятствий велики в сравнении с длиной световой волны, то дифракционными явлениями можно пренебречь и считать распространение света прямолинейным. При этом описание явлений и анализ действия различных устройств сводится к рассмотрению геометрии хода световых лучей.

Геометрическую оптику можно считать предельным случаем волновой оптики, когда длина волны очень мала в сравнении с другими размерами, учитываемыми в решаемой задаче.

В основе геометрической оптики лежит принцип, сформулированный в 1660 г. П. Ферма. В простейшей формулировке этот принцип звучит так: *в пространстве между двумя точками свет распространяется по тому пути, вдоль которого время его прохождения минимально.*

Величина, равная отношению скорости света c в вакууме к скорости v в данной среде, называется *абсолютным показателем преломления* этой среды:

$$n = \frac{c}{v}.$$

В вакууме скорость света максимальна. В оптической среде с показателем преломления n время прохождения светом того же расстояния увеличивается в n раз. Величина s , равная произведению абсолютного показателя преломления n на пройденное расстояние l ($s = nl$), называется *оптической длиной пути*.

Используя принцип Ферма, можно получить законы прямолинейного распространения света, отражения и преломления.

Прямолинейность распространения света. Свет из одной точки в другую распространяется по кратчайшему расстоянию. В однородной среде кратчайшим оптическим путем является прямая линия.

Однако в неоднородной среде кратчайшим оптическим путем может оказаться некоторая кривая (или ломаная) линия, вдоль которой показатель преломления меньше, чем вдоль геометрической прямой. Этим объясняется явление преломления света и искривление световых лучей в неоднородной среде — явление *рефракции*.

Закон отражения. Пусть на зеркальную поверхность падает свет из точки A . В точке A^* собираются лучи, отраженные от зеркала (рис. 92).

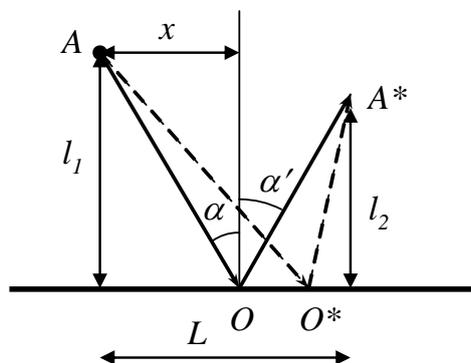


Рис. 92

Предположим, что свет из точки A в точку A^* может распространяться двумя путями — отражаясь от точек O и O^* . Время, которое потребуется свету, чтобы пройти из источника A в точку A^* через точку O , можно определить из выражения

$$t = \frac{AO}{v} + \frac{AO^*}{v} = \frac{\sqrt{l_1^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{l_2^2 + (L-x)^2}}{v}.$$

Здесь v — скорость распространения света. Покажем, что время прохождения света по траектории AOA^* меньше, чем по любой другой траектории AO^*A^* .

Для этого продифференцируем данное выражение и приравняем производную к нулю в соответствии с принципом Ферма.

Учтем, что $\sin \alpha = \frac{x}{AO}$, $\sin \alpha' = \frac{(L-x)}{AO^*}$. Получим:

$$\frac{dt}{dx} = t'_x = \frac{x}{vAO} - \frac{L-x}{vOA^*} = \frac{1}{v}(\sin \alpha - \sin \alpha') = 0.$$

Отсюда получаем $\sin \alpha = \sin \alpha'$; а так как оба угла острые, то отсюда следует равенство углов:

$$\alpha = \alpha'.$$

Мы получили соотношение, выражающее закон отражения света: угол отражения равен углу падения. Из принципа Ферма следует и вторая часть этого закона: отраженный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль к отражающей поверхности. Ведь если бы эти лучи лежали в разных плоскостях, то не был бы минимальным путь AOA^* .

Закон преломления света. Аналогичным образом, используя принцип Ферма, рассмотрим явление, происходящее на границе раздела двух сред. Пусть в первой среде скорость света v_1 , а во второй среде — v_2 (рис. 93).

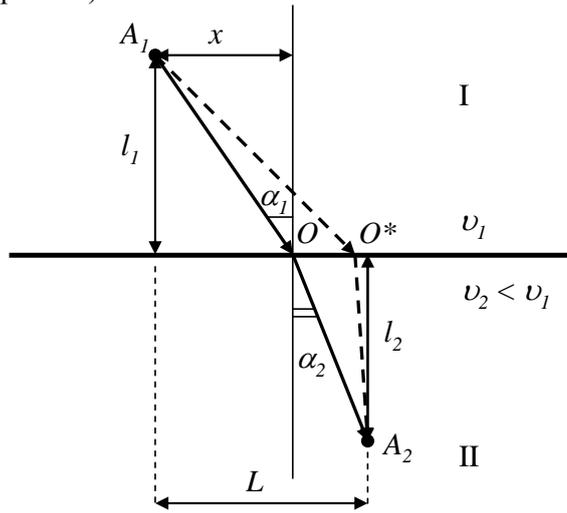


Рис. 93

Для прохождения света из точки A_1 в точку A_2 будет затрачено время

$$t = \frac{\sqrt{l_1^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{l_2^2 + (L-x)^2}}{v_2}.$$

Выберем из всех возможных траекторий распространения света ту, которой соответствует минимальное время. Продифференцировав и положив производную равной нулю, получим:

$$\frac{dt}{dx} = t'_x = \frac{x}{v_1 A_1 O} - \frac{L-x}{v_2 O A_2} = 0.$$

Учитывая, что $\sin \alpha_1 = \frac{x}{A_1 O}$, $\sin \alpha_2 = \frac{(L-x)}{O A_2}$, получим:

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} - \frac{\sin \alpha_2}{v_2} = 0.$$

Откуда следует:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Это и есть закон преломления света. Из построений и принципа Ферма следует также, что преломленный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и перпендикуляр к поверхности раздела двух сред.

Из закона преломления света вытекает, что при падении света из оптически менее плотной среды в более плотную ($n_1 < n_2$) угол падения больше угла преломления ($\alpha_1 > \alpha_2$). Если же свет идет из оптически более плотной среды в менее плотную ($n_1 > n_2$), то угол падения меньше угла преломления ($\alpha_1 < \alpha_2$) (рис. 94). В этом случае при некотором угле падения α_1 , большем предельного, пучок света, падающий на границу раздела, отражается от нее как от зеркала. Это явление получило название *полного отражения*. Найдем значение предельного угла:

$$n_1 \sin \alpha_{\text{пред}} = n_2 \sin 90^\circ ;$$

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1} .$$

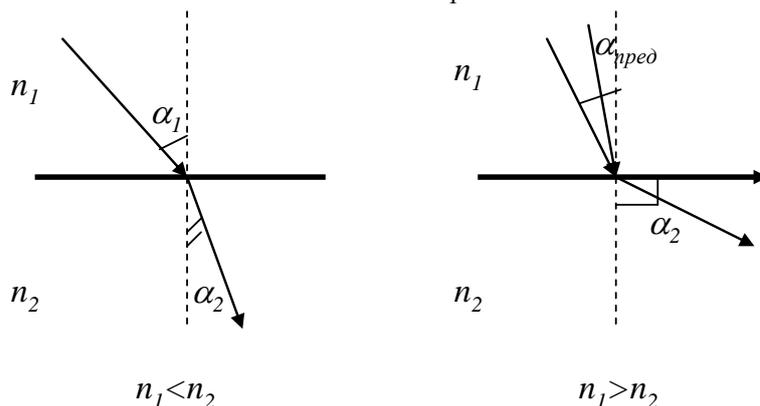


Рис. 94

Явлением полного отражения объясняется исключительная белизна свежевыпавшего снега (он отражает более 90% падающих на него солнечных лучей). Предположим, что световые лучи падают на границу льда и воздуха внутри льда. В этом случае все лучи с углами падения больше 48° будут полностью отражаться от границы лед — воздух. Снег — это в конечном счете лед (ведь снежинки состоят из мелких льдинок), но лед этот не монолитен, а пронизан множеством воздушных пор. Попадая на поверхность снега, солнечные лучи сравнительно легко проникают внутрь снеговых льдинок, находящихся вблизи поверхности. Проникнуть глубже в снег лучам не дают полные отражения от многочисленных поверхностей, отделяющих льдинки от воздуха, который заполняет внутренние поры в снегу. Когда эти поры исчезают (при образовании монолитного льда или в результате заполнения талой водой), отражение света существенно уменьшается — в этом случае значительная часть солнечных лучей проникает достаточно глубоко внутрь покрова и там поглощается.

На явлении полного внутреннего отражения основано появление целого раздела оптики — волоконной оптики, в котором изучается формирование изображений при распространении света по световодам. Свет от источника распространяется по световодам, диаметр которых в зависимости от назначения колеблется от нескольких микрон до миллиметров. В применяемом стеклянном волокне основная световедущая жила окружена оболочкой с меньшим показателем преломления (рис. 95). На границе раздела двух сред происходит полное отражение света. За счет этого световой пучок практически без потерь проходит от источника к освещаемой поверхности.

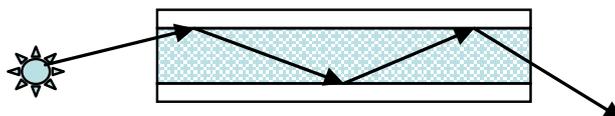


Рис. 95

Применение различных устройств волоконной оптики очень широко: от техники до медицины. Например, одножильные световоды уже много лет применяют для освещения внут-

ренных поверхностей желудка, мочевого пузыря и других внутренних органов при диагностике и проведении операций. В технике световоды применяются для освещения недоступных мест, а также для передачи сигналов на большие расстояния. Модулируя световой пучок, идущий по световоду, можно по нему на значительные расстояния передавать информацию — речь, музыку, изображения, информацию от ЭВМ и т.п.

§ 54. Линзы

Линза — это прозрачное тело (чаще из стекла или пластмассы), ограниченное двумя сферическими поверхностями с радиусами кривизны R_1 и R_2 . Одна из поверхностей линзы может быть плоской ($R = \infty$). По форме ограничивающих поверхностей различают шесть типов линз: двояковыпуклая, плосковыпуклая, вогнуто-выпуклая, двояковогнутая, плосковогнутая, выпукло-вогнутая (рис. 96).

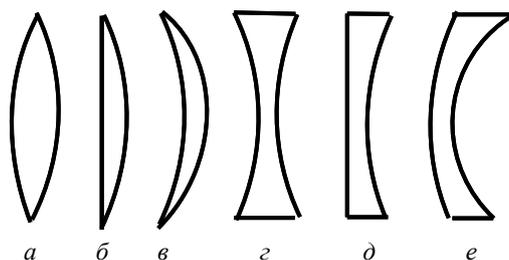


Рис. 96

Тонкой называется линза, толщина которой значительно меньше радиусов ограничивающих ее сферических поверхностей. Линза, которая в середине толще, чем у краев, называется *выпуклой (собирающей) линзой* (рис. 96, а, б, в). Линза, которая у краев толще, чем в середине, называется *вогнутой (рассеивающей) линзой* (рис. 96, г, д, е).

Прямая, проходящая через центры O_1 и O_2 сферических поверхностей линзы, называется *главной оптической осью* линзы (рис. 97).

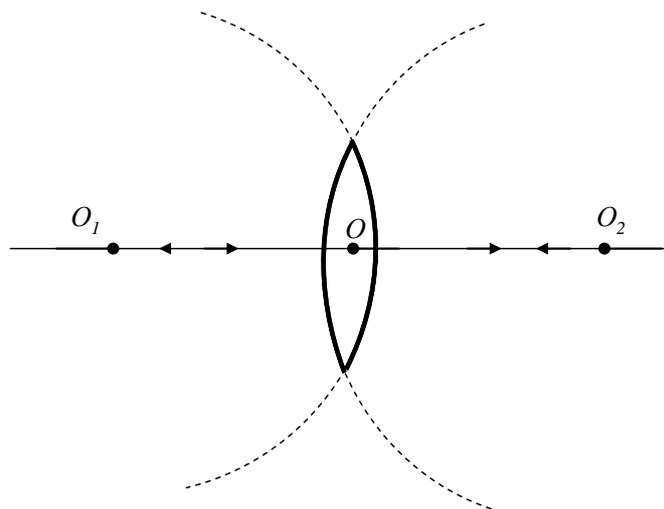


Рис. 97

Если толщина пренебрежимо мала, то можно считать, что главная оптическая ось пересекается с линзой в одной точке. Точка O пересечения главной оптической оси с тонкой линзой называется *оптическим центром* линзы.

Опыт показывает, что луч света, идущий вдоль главной оптической оси проходит через линзу без изменения направления распространения. В воздухе или в вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси собирающей линзы, после прохождения линзы отклоняются к оси и проходят через одну точку F на главной оптической оси (рис. 98, а). Точка F называется

ется *главным фокусом* линзы. Плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью*.

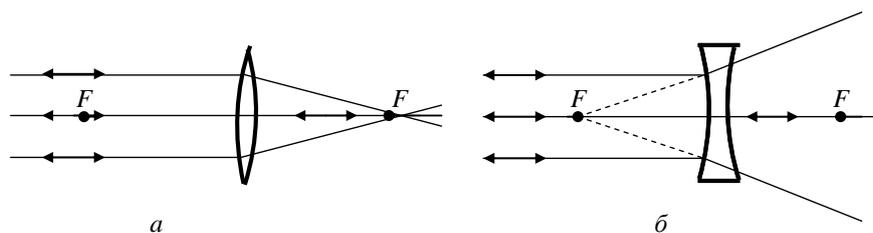


Рис. 98

У линзы два главных фокуса, в однородной среде они расположены на одинаковых расстояниях от ее оптического центра. Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса — *фокусное расстояние* линзы. Все лучи, проходящие через один из главных фокусов, выходят из линзы параллельно главной оптической оси.

В воздухе или вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси рассеивающей линзы, отклоняются от оптической оси. Продолжения лучей в противоположную сторону сходятся в одной точке F на главной оптической оси перед линзой (рис. 98, б). Эта точка называется *главным мнимым фокусом* (в действительности лучи света в нем не собираются).

Основное свойство линз, используемое в оптических приборах, заключается в том, что все лучи, исходящие из одной точки A перед линзой, собираются в другой точке A_1 за линзой (рис. 99, а) или кажутся исходящими из одной точки A_2 перед линзой (рис. 99, б). В первом случае изображение точки A называется *действительным*, во втором — *мнимым*.

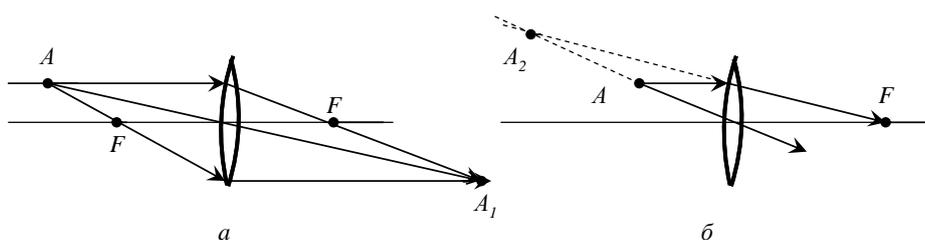


Рис. 99

Замечательным свойством лучей является свойство обратимости: луч, направленный противоположно лучу, выходящему из любой оптической системы, пройдет через нее в обратном направлении точно по тому же пути, по какому прошел ее в прямом направлении первый луч.

Используя свойства лучей, проходящих через оптический центр линзы или ее фокусы, а также лучей, параллельных главной оптической оси, можно построить изображение любого предмета, получаемое с помощью собирающей или рассеивающей линзы. Условные изображения собирающей и рассеивающей линз представлены на рисунке 100.

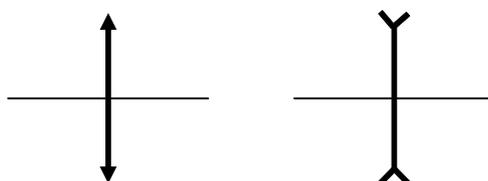


Рис. 100

Расстояние f от собирающей линзы до изображения связано с расстоянием d от предмета до линзы и фокусным расстоянием F линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}.$$

Это уравнение называется *формулой линзы*. Данная формула применима для нахождения расстояния до изображения при любом расположении предмета относительно линзы.

Если значение расстояния f получается при расчете отрицательным, то это значит, что изображение предмета мнимое и находится по ту же сторону от линзы, что и предмет. Для рассеивающей линзы значение фокусного расстояния в расчетах нужно брать со знаком «минус» и, так как изображение предмета получается мнимым, расстояние f до изображения всегда должно быть со знаком «минус».

Величина, обратная фокусному расстоянию F , называется *оптической силой линзы* D :

$$D = \frac{1}{F}.$$

Оптическая сила выражается в *диоптриях* (*дптр.*). Оптическая сила собирающей линзы положительна, оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна.

§ 55. Глаз как оптическая система

Устройство глаза человека — самой совершенной системы, созданной в ходе эволюции, — показано на рисунке 101. Наружную оболочку глазного яблока образует склера 1, она защищает внутреннее содержание глаза и обеспечивает его жесткость. На передней поверхности склера переходит в тонкую прозрачную роговицу 2, через которую в глаз проникает свет. За роговицей расположена радужная оболочка 3 с отверстием — зрачком 4. Радужная оболочка представляет собой мышечное кольцо, окрашенное пигментом. Это кольцо, сжимаясь или растягиваясь, меняет размеры зрачка и тем самым световой поток, попадающий в глаз, т.е. действует как диафрагма.

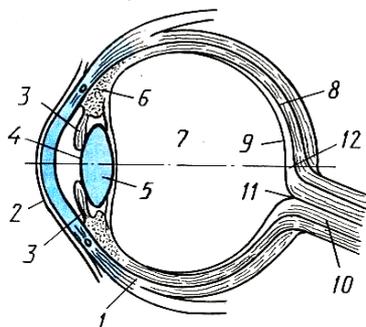


Рис. 101

За радужной оболочкой находится хрусталик 5 — эластичное линзоподобное тело. С помощью цилиарной связки 6, которая может менять свое натяжение, изменяются радиусы кривизны поверхности хрусталика и тем самым его оптическая сила (явление *аккомодации*). Полость между роговицей и хрусталиком заполнена водянистой влагой; за хрусталиком находится стекловидное тело 7. Роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, аналогичную линзе с оптической силой около 58,5 дптр.

Сетчатка 9 представляет собой полусферу, состоящую из рецепторных клеток, имеющих форму колбочек и палочек. Всего в глазу 125 млн. палочек и 6,5 млн. колбочек. В центре сетчатки, на оптической оси, находится центральная ямка — область наибольшей остроты зрения. Здесь сосредоточены колбочки, с помощью которых глаз ощущает цвета. В остальных участках сетчатки расположены в основном палочки.

Под действием света в палочках происходит перестройка особого вещества — зрительного пурпура (родопсина). Родопсин — это соединение одной из форм витамина А (ретинола) с белком сетчатки (оксином). Под действием света ретинол переходит из одной формы в другую (из цис- в транс-форму). Это вызывает генерацию в клетке нервного импульса, который через зрительный нерв 10 передается в мозг.

Палочки осуществляют так называемое сумеречное зрение, с помощью которого различаются размеры и форма предметов, но не их цвета. Цветовое зрение осуществляется с помощью колбочек, что возможно, если изображение предмета попадает на центральную ямку. Теория цветового зрения еще недостаточно разработана. Предполагают, что есть три типа колбочек, которые различно реагируют на разные участки спектра. В зависимости от степени раздражения каждого из этих типов колбочек мозг получает различные серии нервных импульсов и интерпретирует это как разные цвета.

Самые распространенные дефекты глаза — *близорукость* и *дальнозоркость*. Если оптическая система глаза дает изображение далеких предметов за сетчаткой, то человек страдает дальнозоркостью. Для исправления этого дефекта применяются очки с собирающими линзами (рис. 102, *а*). При близорукости глаза изображение получается перед сетчаткой. Для исправления этого дефекта применяются очки с рассеивающими линзами (рис. 102, *б*).

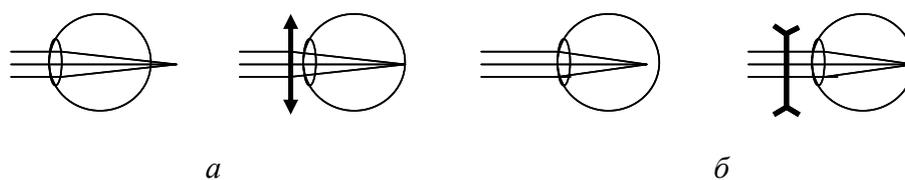


Рис. 102

Рассматривая предмет двумя глазами, мы получаем на сетчатке каждого из них несколько различные изображения. В то же время мы воспринимаем один предмет, но видим его стереоскопически, т.е. объемно (*бинокулярное зрение*). Представление о глубине пространства возникает благодаря тому, что, направляя оба глаза на один объект, мы усилием глазных мышц поворачиваем их так, чтобы их оптические оси пересекались на предмете.

Глаз характеризуется *разрешающей способностью*, оцениваемой по минимальному углу зрения, под которым две точки еще видны раздельно. Опыт показывает, что данный угол $\approx 1'$. Две точки изображения воспринимаются раздельно, если попадают на две разные светочувствительные клетки сетчатки.

Перечислим основные отличительные черты в строении глаз у различных представителей животного мира. Большинство членистоногих имеют много глаз, ориентированных по всем направлениям. Каждый такой глаз, имеющий форму очень узкой и глубокой воронки, в которой воспринимающий аппарат расположен глубоко на дне, видит только в одном определенном направлении; недостаток такого глаза — его ничтожная светосила: к воспринимающему аппарату поступит лишь чрезвычайно узкий поток света. Поэтому животные, снабженные сложными фасеточными глазами (насекомые, раки), не отличаются остротой зрения. Однако благодаря тому, что отдельные глаза направлены в разные стороны и весь глаз велик по сравнению с размерами насекомого, поле зрения насекомых оказывается значительным.

У рыб глаза отличаются плоской роговицей и шаровидным хрусталиком. Аккомодация глаза у рыб достигается перемещением хрусталика. Среди глубоководных встречаются рыбы с огромными телескопическими глазами, способными улавливать очень слабый свет. Глазное яблоко у этих рыб принимает удлиненную форму, роговица выпуклая, хрусталик и зрачок имеют большие размеры.

У земноводных роговица глаза очень выпуклая. Аккомодация глаз осуществляется, как и у рыб, перемещением хрусталика.

Аккомодация у пресмыкающихся происходит не только за счет перемещения хрусталика, но и путем изменения его формы.

Птицы обладают очень острым зрением, превосходящим зрение других животных. Глазное яблоко очень больших размеров и своеобразного строения, благодаря которому увеличивается поле зрения. У птиц, имеющих особенно острое зрение (грифы, орлы), глазное яблоко удлиненной «телескопической» формы.

Глаза млекопитающих, обитающих в воде (например, китов), по выпуклости роговицы и по большому показателю преломления напоминают глаза глубоководных рыб.

Глаза высокоорганизованных животных по строению подобны глазу человека, только обладают большей светосилой. Однако поле зрения оказывается меньшим. В ряде случаев этот недостаток компенсируется большей подвижностью глаз: животные могут ими вращать (хамелеон). В других случаях (например, у зайца) они расположены по бокам головы, что дает обзор свыше 180° .

§ 56. Приборы, увеличивающие угол зрения

Для того чтобы получить достаточную информацию о структуре рассматриваемого глазом предмета, необходимо, чтобы изображения отдельных участков проецировались на разные све-

точувствительные участки сетчатки. Размер изображения на сетчатке определяется углом зрения, под которым виден предмет. Следовательно, увеличение объема зрительной информации может быть достигнуто лишь за счет увеличения угла зрения.

Простейший способ увеличить угол зрения — приблизить предмет к глазу (или глаз к предмету), что мы часто делаем. Однако это далеко не всегда возможно. Возникает потребность в создании приборов, позволяющих искусственно увеличить угол зрения. С этой целью используют лупу, микроскоп и телескоп.

Лупа — короткофокусная собирающая линза, которую помещают между глазом и предметом (предмет — между оптическим центром и фокусом) (рис. 103).

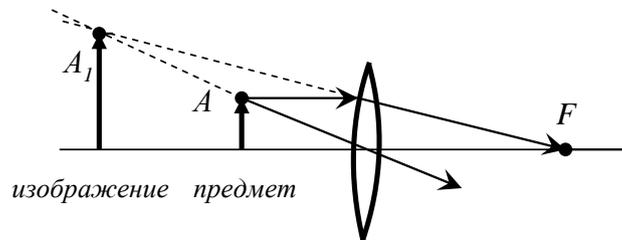


Рис. 103

Чем меньше фокусное расстояние лупы, тем большее увеличение она дает. На практике лупы с фокусным расстоянием меньше 2 см не применяют. Такие короткофокусные линзы вносят столь серьезные искажения в получаемые изображения, что практически теряется смысл в увеличении. Именно поэтому наибольшее угловое увеличение лучших луп — от пяти до десяти.

Оптический микроскоп — комбинация двух короткофокусных систем — объектива и окуляра. Схема построения изображения в микроскопе приведена на рис. 104.

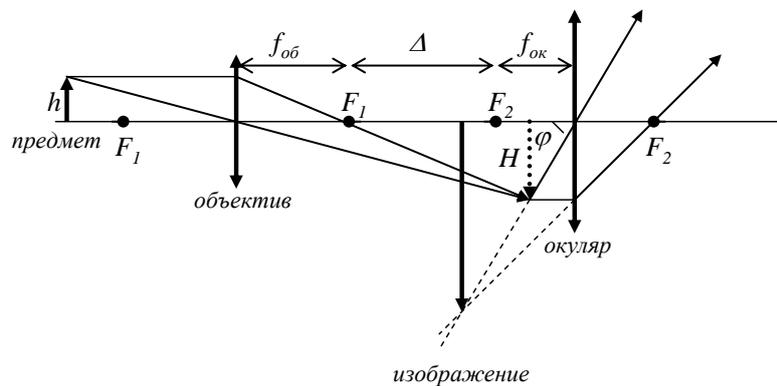


Рис. 104

Фокусные расстояния объектива и окуляра много меньше расстояния Δ между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра. Поэтому можно считать, что $\Delta + f_{об} \approx \Delta$. Предмет высотой h расположен за фокусом F_1 объектива, вблизи него. Объектив дает увеличенное изображение предмета. Это изображение за счет соответствующего подбора линз получается между окуляром и его фокусом F_2 . Поэтому окуляр, работая как лупа, дает сильно увеличенное мнимое изображение предмета. Анализ рисунка показывает, что

$$\frac{H}{h} = \frac{\Delta + f_{об}}{f_{об}} \approx \frac{\Delta}{f_{об}}.$$

Это соотношение можно использовать для определения углового увеличения микроскопа:

$$\gamma = \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } \varphi_0} = \frac{HD}{f_{ок}h} \approx \frac{h\Delta D}{f_{об}f_{ок}h} = \frac{\Delta D}{f_{об}f_{ок}}.$$

Итак, угловое увеличение микроскопа

$$\gamma = \frac{\Delta D}{f_{об}f_{ок}},$$

где $D \approx 25$ см — расстояние наилучшего зрения, а Δ — длина тубуса микроскопа.

Предельные значения увеличения микроскопа от 500 до 1000, они не могут быть больше из-за волновых свойств света.

Дифракция ограничивает также и одну из главных характеристик микроскопа — его разрешающую способность. Разрешающая способность определяется тем минимальным расстоянием (чаще линейным) между близлежащими точками, при котором эти точки еще можно наблюдать раздельно. Определить это расстояние позволяет формула Г. Гельмгольца:

$$a_{\min} = \frac{0,61\lambda}{n \sin \alpha}.$$

Здесь λ — длина волны, n — показатель преломления жидкости, находящейся между исследуемым объектом и объективом (иммерсионная жидкость), α — апертурный угол, т.е. угол, под которым радиус передней линзы объектива виден из центра исследуемого объекта (рис. 105).

Из формулы видно, что с уменьшением длины волны предел разрешения микроскопа уменьшается. Увеличить знаменатель можно только за счет n , так как апертурный угол в хороших микроскопах практически достиг своего предела (90°).

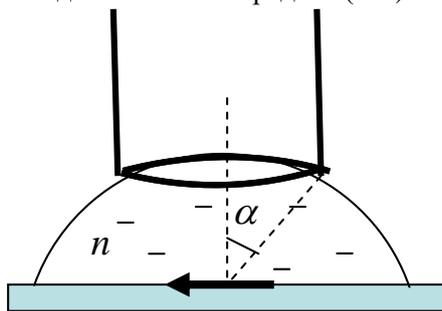


Рис. 105

Увеличить n позволяет применение иммерсионных жидкостей с большим показателем преломления, например кедрового масла ($n \approx 1,5$).

С учетом этого получаем:

$$a_{\min} \approx 0,4\lambda.$$

Значит, принципиально нельзя с помощью оптического микроскопа рассмотреть какие-либо детали, размер которых меньше $0,4\lambda$. Волновые свойства света накладывают свои ограничения, их нельзя преодолеть.

Для наблюдения удаленных объектов (планет, звезд) в астрономии используют *телескопы*, которые бывают двух видов — рефлекторы и рефракторы. Действие рефлектора — отражающего телескопа — основано на использовании зеркального, отражающего объектива (рис. 106). Пучок света отражается от вогнутого зеркала $З$, затем попадает на другое небольшое вспомогательное зеркало $С$, а оттуда — в линзовый окуляр $ОК$. Заметим, что изготовить хорошо отшлифованное зеркало большого диаметра гораздо проще, чем линзу. Поэтому современные телескопы с диаметром объектива в несколько метров — всегда рефлекторы. Самый крупный зеркальный телескоп, построенный в нашей стране, имеет диаметр зеркала 6 м.

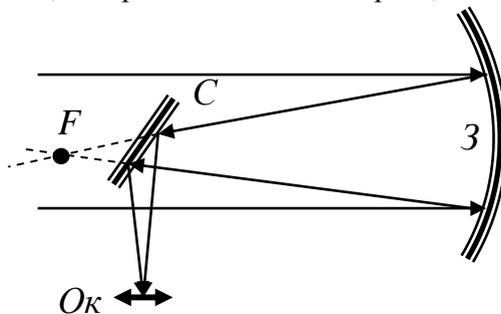


Рис. 106

В рефракторе — линзовом телескопе, как и в микроскопе, используются две системы линз (рис. 107). Но, в отличие от микроскопа, наблюдаемый объект находится от телескопа на

практически бесконечном расстоянии. Оптическую систему телескопа для получения максимального углового увеличения конструируют так, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Для получения большого углового увеличения необходимо соединить длиннофокусный объектив с короткофокусным окуляром. Телескопы дают существенные (в десятки раз) угловые увеличения удаленных объектов.

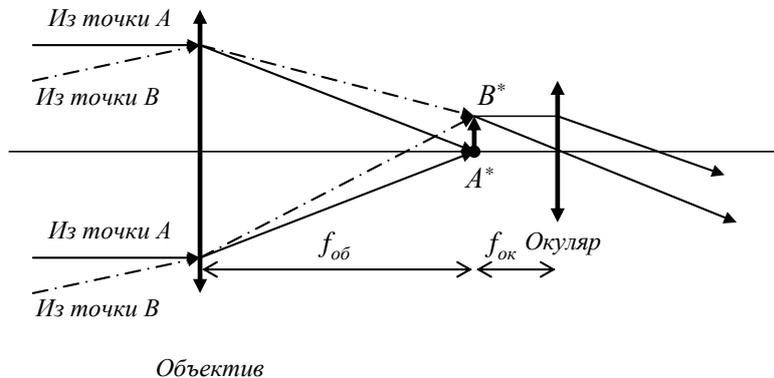


Рис. 107

Оказывается, что даже при большом увеличении угол зрения для очень удаленных звезд все равно меньше минимального разрешаемого угла $1'$, поэтому такие звезды воспринимаются как точки. Телескоп концентрирует большой световой поток на поверхности зрачка. При использовании телескопа освещенность зрачка получается больше освещенности невооруженного глаза во столько раз, во сколько раз площадь объектива телескопа больше площади самого зрачка.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Освойте вывод законов отражения и преломления света на основе принципа Ферма.
2. Используя интернет-ресурсы, подберите наиболее удачную, на Ваш взгляд, презентацию о физических принципах образования миражей. Какие изменения и дополнения Вы хотели бы в нее внести? Скорректируйте презентацию, подготовьте комментарии к слайдам.
3. Для систематизации материала по теме «Линзы» предлагаем Вам заполнить пустые ячейки таблицы. Напомним, что при проведении построений объект удобно изображать в виде стрелки.

Вид линзы	Оптическая сила ($\neq 0$)	Расстояние объекта от линзы	Характеристики изображения	Построение
Собирающая			Увеличенное прямое мнимое	
			Увеличенное перевернутое действительное	
Собирающая		Большее двойного фокусного		
			Уменьшенное прямое мнимое	
Собирающая		Равное двойному фокусному		

4. Как устроен глаз человека? Опишите его действие, опираясь на материал видеоролика «Глаз как оптическая система» (<http://www.youtube.com/watch?v=XEoSrRHiso8>).
5. Перечислите основные отличительные черты в строении глаз у различных представителей животного мира. Ответ оформите в виде таблицы/схемы/кластера (на Ваше усмотрение).
6. Составьте опорный конспект по теме «Приборы, увеличивающие угол зрения». Разработайте комментарий к опорному конспекту.

§ 57. Тепловое излучение

Излучение, испускаемое нагретыми телами, называется *тепловым*. При этом не следует думать, что тепловое излучение возникает только при высоких температурах. Оно происходит и при комнатной температуре. Разница лишь в том, что по мере понижения температуры уменьшается интенсивность излучения и изменяется его спектральный состав. При температуре порядка 800°C испускается в основном красное излучение, длина волны которого составляет около 680 нм , а также невидимое глазом инфракрасное излучение с длиной волны от 10^6 до 10^3 нм .

Каждое тело может не только испускать, но и поглощать тепловое излучение. опыты показали, что чем больше энергии тело излучает при некоторой постоянной температуре, тем сильнее оно поглощает излучение такого же спектрального состава при той же температуре.

Тело, которое при любой не разрушающей его температуре полностью поглощает всю энергию падающего на него света любой частоты, называется *абсолютно черным телом*. Хорошей моделью, близкой к абсолютно черному телу, является небольшое отверстие в ящике сферической формы (рис. 108). Свет, попадающий через отверстие внутрь ящика, будет многократно отражаться от стенок, прежде чем сможет выйти наружу. При каждом отражении свет, независимо от материала стенок, частично поглощается. В результате многократных отражений внутри ящика излучение практически полностью поглощается, и отверстие снаружи кажется совершенно черным.

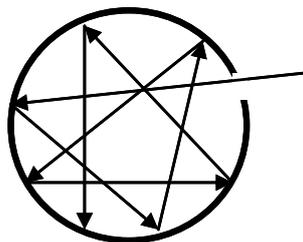


Рис. 108

Абсолютно черных тел не существует — это идеализация. Черный бархат, черная бумага близки по оптическим свойствам к абсолютно черному телу. Абсолютно черное тело является наиболее интенсивным источником теплового излучения. При одной и той же температуре абсолютно черное тело испускает в единицу времени с поверхности единичной площади больше энергии электромагнитного излучения, чем любое другое тело.

Полной лучеиспускательной способностью тела ε называется отношение мощности излучения к площади поверхности излучателя:

$$\varepsilon = \frac{P}{S}.$$

Единицы измерения — $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{с}}$.

Опыт показывает, что полная лучеиспускательная способность зависит от температуры излучающего тела. И. Стефан в 1879 г. экспериментально установил, а Л. Больцман в 1884 г. теоретически доказал, что *полная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры*:

$$\varepsilon = \sigma T^4.$$

Этот закон называется *законом Стефана — Больцмана*. Коэффициент пропорциональности σ — постоянная Стефана:

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4).$$

Из закона Стефана — Больцмана следует, что излучение абсолютно черного тела определяется только его температурой.

Распределение энергии излучения абсолютно черного тела по длинам волн было тщательно изучено на опыте. На рисунке 109 изображены кривые, характеризующие распределение энергии излучения в спектре абсолютно черного тела при нескольких температурах. Площадь, ограниченная каждой кривой и осью абсцисс, определяет полную лучеиспускательную способность тела. Эта площадь быстро растет с увеличением температуры, так как она возрастает пропорционально четвертой степени температуры излучателя.

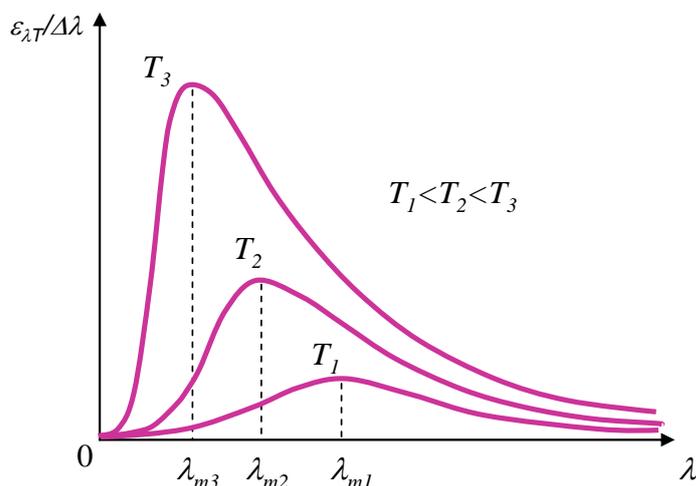


Рис. 109

Обратим внимание на форму кривых распределения при различных температурах. Все кривые имеют максимумы, причем с увеличением температуры большая часть энергии приходится на более короткие волны. Для каждой температуры существует такая длина волны λ_{max} , на которую приходится наибольшая часть энергии, испускаемой абсолютно черным телом. При повышении температуры длина волны λ_{max} уменьшается. С помощью экспериментальных кривых была найдена зависимость λ_{max} от абсолютной температуры:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}.$$

Данная формула математически выражает закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре. Значение постоянной Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Наглядным примером, подтверждающим уменьшение λ_{max} с ростом температуры тела, является изменение цвета свечения нагреваемого металла. Сначала металл остается темным (λ_{max} лежит в инфракрасной области); затем при достаточно высокой температуре появляется красное свечение металла («красное каление»), потом оранжевое, желтое и, наконец, голубовато-белое свечение («белое каление»).

Спектральный состав излучения Солнца очень близок к спектральному составу абсолютно черного тела. Максимум энергии излучения приходится примерно на 470 нм. Воспользовавшись законом смещения Вина, можно рассчитать, что температура наружных слоев Солнца близка к 6200 К.

Квантовая гипотеза Планка. Законы излучения абсолютно черного тела не позволили математически, т.е. при помощи уравнений, описать кривые распределения энергии излучения по длинам волн. Все попытки найти теоретически эту зависимость оказались безуспешными. Более того, эти попытки привели к принципиальным трудностям, значимость которых переросла всю проблему теплового излучения. Последовательное применение идей классической физики к исследованию спектрального состава излучения абсолютно черного тела привело к результатам, противоречащим закону сохранения энергии. Решение этой проблемы нашел в 1900 г. М. Планк.

В классической физике испускание света источником рассматривается как непрерывный процесс. Считается, что излучающее тело непрерывно посылает в пространство электромагнитные волны и энергия источника света непрерывно изменяется. Аналогично рассматривается и процесс поглощения света. Планк предположил, что именно эти представления ведут к противоречиям в теории теплового излучения и должны быть пересмотрены.

Им была высказана гипотеза, согласно которой *абсолютно черное тело испускает свет не непрерывно, а определенными конечными порциями энергии*. Как в дальнейшем было показано Эйнштейном, распространение и поглощение света происходит также порциями — *квантами*. Энергия кванта:

$$E = h\nu,$$

где ν — частота света, h — так называемая постоянная Планка, равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Излучающее тело всегда испускает энергию, равную (для любой частоты) $n h \nu$, где n — любое целое положительное число.

Предположение о прерывистом процессе испускания света оказалось достаточным для создания правильной теории теплового излучения.

§ 58. Фотоэлектрический эффект

В 1887 г. Г. Герц обнаружил, что если направить на отрицательный электрод искрового разрядника ультрафиолетовое излучение, то электрический разряд происходит при меньшем напряжении между электродами, чем в отсутствие освещения. Тщательные исследования, проведенные в 1888—1889 гг. А. Г. Столетовым, позволили понять сущность явления, обнаруженного Герцем: оно обусловлено выбиванием под действием света отрицательных зарядов из металлического катода разрядника. В дальнейшем измерения удельного заряда этих частиц показали, что они представляют собой электроны.

Явление вырывания электронов из твердых и жидких тел под действием света называют *внешним фотоэлектрическим эффектом* (или просто фотоэффектом), а вырванные таким образом электроны — фотоэлектронами.

Схема опытов Столетова представлена на рисунке 110. В электрическую цепь включен конденсатор, положительная обкладка которого — медная сетка C , а отрицательная — цинковая пластина D . Когда от источника света излучение направляют на отрицательно заряженную пластину D , в цепи возникает электрический ток (фототок). Если пластина D заряжена положительно, а сетка C — отрицательно, то гальванометр не обнаруживает электрического тока.

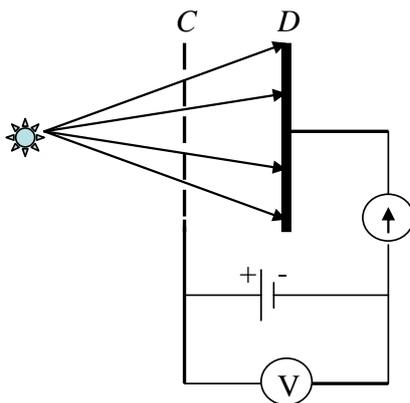


Рис. 110

Опытным путем установлены *три закона внешнего фотоэффекта* (законы Столетова):

- 1) *максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности;*
- 2) *для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. наименьшая частота света ν_{min} , при которой еще возможен фотоэффект;*
- 3) *число фотоэлектронов, вырываемых из катода за 1 с (фототок насыщения), прямо пропорционально интенсивности света.*

Кроме того, установлена *практическая безынерционность фотоэффекта*: он сразу же возникает при освещении поверхности тела при условии, что частота света больше ν_{min} .

Полученные опытным путем законы фотоэффекта не удалось объяснить на основе электромагнитной волновой теории света. С точки зрения этой теории электромагнитная волна, достигнув поверхности металла, вызывает вынужденные колебания электронов, отрывая их от металла. Но тогда требуется время для «раскачки» электронов, и при малой освещенности металла должно возникнуть заметное запаздывание между началом освещения и моментом вылета электронов. Далее, кинетическая энергия электронов, покидающих металл, должна зависеть от амплитуды вынуждающей силы и тем самым от напряженности электрического поля в электромагнитной волне.

Однако все эти выводы противоречат законам фотоэффекта. Решение было найдено А. Эйнштейном в 1905 г. из соображений иных соображений.

Идеи Эйнштейна представляют собой отход от классической волновой оптики. Распространение света здесь рассматривается не как непрерывный волновой процесс; свет — это поток особых частиц (фотонов), движущихся со скоростью c — скоростью света в вакууме. В монохроматическом свете с частотой ν все фотоны имеют одинаковую энергию, равную $E = h\nu$. Поглощение света состоит в том, что фотоны передают всю энергию атомам и молекулам вещества. Из этого следует, что поглощение света, как и его распространение, происходит прерывно, отдельными порциями.

Квантовая точка зрения на природу света позволяет иначе, чем в электромагнитной теории, подойти к объяснению внешнего фотоэффекта. Известно, что для выхода из вещества электрон должен преодолеть потенциальный барьер на границе вещество — вакуум. Для этого ему необходимо совершить работу выхода $A_{вых}$. В результате поглощения фотона его энергия целиком передается электрону. Если эта энергия больше работы выхода, то электрон сможет выйти из вещества. Наибольшую кинетическую энергию, которую сможет приобрести фотоэлектрон, можно найти, исходя из закона сохранения энергии:

$$h\nu = A_{вых} + \frac{mv^2}{2}.$$

Это уравнение называют *уравнением Эйнштейна* для внешнего фотоэффекта.

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все законы внешнего фотоэффекта. Так, из него следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, а следовательно, и его максимальная начальная скорость зависят от частоты света ν и работы выхода $A_{вых}$, но не зависят от интенсивности света. Это есть первый закон внешнего фотоэффекта. Далее из этого же уравнения следует, что внешний фотоэффект возможен лишь при условии, что $h\nu \geq A_{вых}$. Энергии фотона должно, по меньшей мере, хватить на то, чтобы вырвать электрон из вещества (в данном случае металла). Обозначив через ν_{min} наименьшую частоту света, при которой возможен фотоэффект, имеем $h\nu_{min} = A_{вых}$, следовательно, граничная длина волны

$\lambda_{max} = \frac{hc}{A_{вых}}$. *Красная граница* фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, т.е.

от химической природы металла и состояния его поверхности. Так объясняется второй закон фотоэффекта. Красной эта граница названа потому, что при $\lambda > \lambda_{max}$, т.е. в случае «более красного» света, фотоэффект не происходит.

Наконец, общее число N фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность металла, должно быть пропорционально числу фотонов n , падающих за это время на поверхность. Если H — освещенность поверхности, пропорциональная интенсивности света, то число ежесекундно падающих на поверхность фотонов составляет $n \sim \frac{H}{h\nu} \sim \frac{I}{h\nu}$. Таким образом, доказывается третий закон внешнего фотоэффекта: число фотоэлектронов, ежесекундно вылетающих из металла, пропорционально интенсивности света:

$$N \sim I.$$

Фотоэлектрический эффект нашел широкое применение в технике. На основе внешнего фотоэффекта работают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

Вакуумный фотоэлемент (рис. 111) представляет собой стеклянный сосуд, в котором создан глубокий вакуум. Половину баллона покрывают тонким слоем серебра (это подложка),

на который напыляют светочувствительный слой из металла, оксида бария или соединения сурьмы с цезием и т.п. Этот электрод служит катодом. В центре фотоэлемента помещают анод в виде кольца или цилиндра.

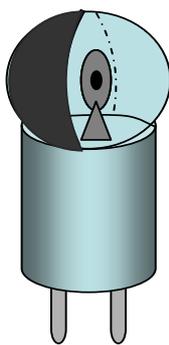


Рис. 111

При включении в цепь фотоэлемента ток в ней не возникает из-за отсутствия свободных электронов между катодом и анодом. Однако если катод осветить, то из него вылетают фотоэлектроны и в цепи течет ток. А так как сила фототока пропорциональна интенсивности света, то колебания освещенности катода вызывают колебания силы тока в цепи. Сила фототока в вакуумных фотоэлементах мала. Для усиления тока используют иногда ударную ионизацию газа. С этой целью баллон заполняют инертным газом (чаще всего аргоном) под давлением около 1—10 Па. За счет ударной ионизации сила тока возрастает в десятки раз.

Вакуумные фотоэлементы применяются в схемах световой сигнализации, а также в звуковом кино для воспроизведения звука, записанного на пленку оптическим способом.

§ 59. Дисперсия света

Под *дисперсией света* понимают явления, обусловленные зависимостью показателя преломления n вещества от длины волны λ .

Зависимость $n(\lambda)$ в той или иной мере свойственна всем веществам. Среды с выраженной зависимостью $n(\lambda)$ называются *диспергирующими*. В большинстве случаев на границе двух различных прозрачных сред коротковолновое излучение преломляется сильнее, чем длинноволновое (например, при переходе света из воздуха в стекло, кварц или воду фиолетовые лучи преломляются сильнее, чем красные). По существу, это обусловлено зависимостью относительного показателя преломления от длины волны, из-за чего монохроматические составляющие сложного света при одинаковом угле падения преломляются под разными углами. Явление дисперсии используется для разложения сложного излучения на монохроматические составляющие. Например, при прохождении пучка белого света сквозь трехгранную призму из вещества, обладающего достаточной дисперсией (стекло, кварц, флюорит и др.), он разлагается в спектр: лучи разной длины волны отклоняются призмой на различные углы (рис. 112).

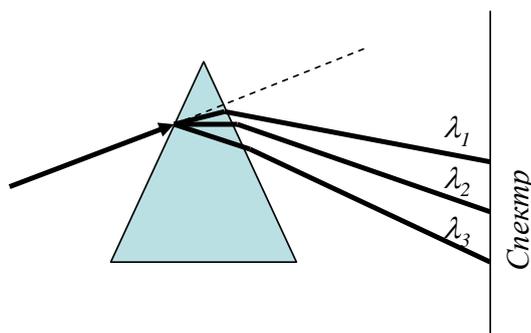


Рис. 112

§ 60. Поглощение света. Закон Бугера — Ламберта — Бера

При прохождении пучка света сквозь слой вещества его интенсивность уменьшается — часть световой энергии поглощается веществом. Поглощение света веществом обычно носит избирательный (селективный) характер: свет разных длин волн поглощается по-разному. Поэтому большинство окружающих нас тел имеет «собственный» цвет. Из потока белого света тело поглощает лучи только определенных длин волн, остальные — отражаются, пропускаются или рассеиваются и могут восприниматься глазом. Наблюдаемая окраска тела — дополнительная к суммарной цветности лучей, поглощенных телом. Так, желтый светофильтр поглощает в сине-зеленой и красной областях спектра.

Многие вещества, прозрачные для света, обладают сильным избирательным поглощением в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Например, обычное стекло поглощает ультрафиолетовые и дальние инфракрасные лучи. Прозрачными для ультрафиолета являются специальные стекла (кварцевое, увиолевое), а для инфракрасных лучей (в определенных интервалах длин волн) — кристаллы NaCl, LiF, флюорит и др.

Избирательным поглощением стекла (или полиэтиленовой пленки) обусловлен парниковый эффект: значительная часть инфракрасного излучения, испускаемого нагретой землей, поглощается стеклом (или пленкой) и таким образом задерживается внутри парника. Слой озона в верхних слоях атмосферы (высота 15—60 км) интенсивно поглощает ультрафиолет и тем самым надежно защищает живую природу на Земле от губительного действия коротковолнового излучения. Биологические ткани, клеточные структуры, отдельные органические молекулы также сильно поглощают ультрафиолетовое излучение.

При распространении света в однородной среде, как показали опыты П. Бугера (1729 г.) и И. Ламберта (1760 г.), уменьшение интенсивности света dI на малом пути dl пропорционально длине этого пути и самой интенсивности I :

$$-dI = kI dl,$$

где k — коэффициент поглощения, зависящий от рода вещества и длины волны. Данное равенство означает, что *слои вещества одинаковой толщины поглощают одну и ту же долю падающего на них светового потока*.

Чтобы определить полное изменение интенсивности света после его прохождения сквозь слой толщиной l (рис. 113, а), проинтегрируем уравнение, предварительно разделив переменные:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^l k dl,$$

$$\ln I - \ln I_0 = -kl,$$

$$I = I_0 e^{-kl},$$

где I_0 и I — интенсивности светового пучка при входе в слой и выходе из него. Последнее соотношение называют *законом Бугера — Ламберта*.

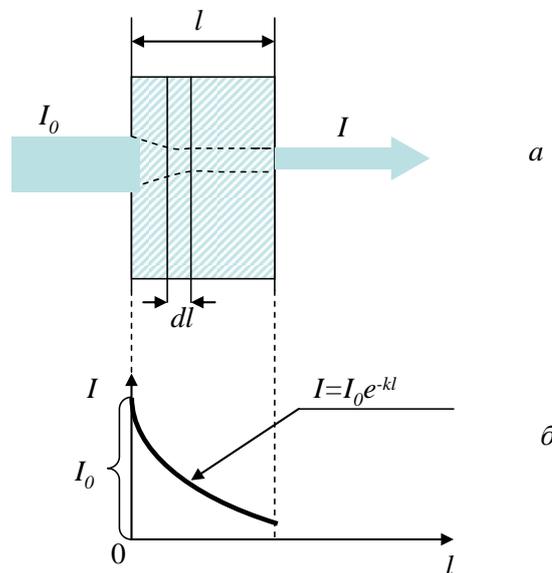


Рис. 113

При распространении света в веществе его интенсивность падает по экспоненте (рис. 113, б).

В слое толщиной $l = \frac{1}{k}$ интенсивность света падает в $e \approx 2,72$ раза.

Большое практическое значение имеет поглощение света растворами. А. Бер (1852 г.) показал, что для веществ, растворенных в прозрачных растворителях, коэффициент поглощения k пропорционален их концентрации в растворе (*закон Бера*):

$$k = AC ,$$

где A — коэффициент пропорциональности, постоянный в случае слабых растворов и зависящий от рода молекул растворенного вещества (при больших концентрациях C этот коэффициент начинает зависеть от C и пропорциональная зависимость $k(C)$ нарушается).

Поглощение света растворами описывается *законом Бугера — Ламберта — Бера*:

$$I = I_0 e^{-ACl} .$$

§ 61. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм света

Необходимость объяснения ряда экспериментальных данных, относящихся к испусканию электромагнитного излучения и его взаимодействию с веществом, привела к тому, что в начале XX в. утвердились новые представления об излучении. Электромагнитное излучение (в том числе и свет) стали рассматривать не как непрерывную электромагнитную волну, а как поток отдельных порций электромагнитного поля — квантов, или фотонов. Существование фотонов надежно доказано многочисленными экспериментами. Фотон ведет себя как дискретная материальная частица, обладающая энергией, массой, импульсом.

Энергия фотона определяется частотой ν (или длиной волны λ) излучения:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} ,$$

где h — постоянная Планка.

Массу фотона можно определить из соотношения:

$$m_\phi = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} .$$

Фотон не имеет массы покоя и существует только в движении. При остановке он перестает существовать — поглощается атомами или молекулами вещества, а его энергия при этом переходит в другие виды. Материальность фотона проявляется, в частности, в том, что сила тяжести действует на него так же, как и на другие частицы: луч света, проходящий вблизи тел большой массы, искривляется в поле тяготения. Масса световых квантов невелика, но для рентгеновских лучей и γ -излучения она становится сравнимой с массой покоя электрона.

Фотоны не имеют электрического заряда, самопроизвольно не распадаются и могут двигаться только со скоростью, равной скорости света в вакууме (c). Последнее не противоречит тому, что в веществе свет распространяется с меньшей скоростью. Уменьшение скорости света в веществе объясняется взаимодействием фотонов с веществом — они поглощаются атомами и с некоторым запозданием излучаются снова (переизлучаются).

Импульс фотона определяется выражением

$$p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} .$$

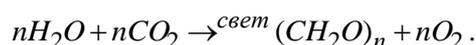
Наличие у фотонов импульса подтверждается существованием *светового давления*, измеренного П. Н. Лебедевым. Истолкование светового давления с корпускулярной точки зрения основано на передаче фотонами своего импульса освещаемой поверхности.

Свет (как любое электромагнитное излучение) обладает *корпускулярно-волновым дуализмом*: в различных явлениях он обнаруживает как волновые, так и корпускулярные свойства. Не случайно корпускулярные характеристики фотона — энергия и импульс — неразрывно связаны с волновой характеристикой света — частотой. Корпускулярные и волновые свойства света проявляются в разной мере в зависимости от характера и условий эксперимента. Так, в явлении фотоэффекта свет взаимодействует с веществом как поток дискретных частиц (фотонов), а при прохождении через узкие отверстия в преградах он ведет себя как волна (дифракция). С увеличением частоты корпускулярные свойства фотонов проявляются все сильнее. Если для низкочастотного инфракрасного излучения или радиоволн более характерными являются волновые свойства, то высокочастотное рентгеновское излучение ведет себя в основном как поток корпускул. *Единство прерывного и непрерывного — фундаментальная особенность всей материальной природы.*

§ 62. Биологическое действие света

Свет играет огромную роль в живой природе. Под влиянием света происходит важнейший процесс в жизни зеленых растений — синтез органических соединений из неорганических. При этом выделяется свободный кислород, а энергия света аккумулируется растениями и переводится в химическую.

Свет поглощается в основном пигментом зеленых растений — хлорофиллом. Активированные светом молекулы хлорофилла участвуют в процессе межмолекулярного переноса электронов. Поглощенная энергия перераспределяется между молекулами и связями и инициирует цепь сложных химических реакций, приводящих к образованию углеводов и других органических соединений. Схематически этот процесс можно представить так:



Интенсивность протекания фотосинтеза зависит от многих факторов. В частности, наблюдения показывают, что он идет быстрее, если растение находится в электрическом поле определенной полярности. Главным источником органической биомассы и поставщиком атмосферного кислорода на Земле являются растения. Они используют около 2% падающей на них солнечной энергии, и в среднем каждый квадратный дециметр поверхности зеленых листьев усваивает из атмосферы 10 мг углекислого газа в 1 час. Продукция фотосинтеза на всем земном шаре составляет $4 \cdot 10^{10}$ т связанного углерода в год.

Свет вызывает фотохимические реакции в фоторецепторах сетчатки глаза человека. Молекулы зрительного пигмента — родопсина — активируются фотонами света и распадаются, давая начало сложному процессу зрительного восприятия.

Ультрафиолетовое излучение оказывает на живые организмы сильное биологическое действие. Мощным источником УФ-излучения является Солнце, но земная атмосфера поглощает его коротковолновую часть ($\lambda < 200$ нм). Поверхности Земли достигают фотоны с энергией 3—7 эВ, достаточной для разрушения химических связей в некоторых белковых молекулах, что служит началом фотохимических реакций. В результате этих реакций в живом организме образуются новые биологически активные вещества. Под действием ультрафиолетовых лучей в коже синтезируется важный для нормальной жизнедеятельности организма витамин *D*. УФ-лучи проникают сквозь кожу человека на глубину до 0,5 мм. Небольшие их дозы полезны для человека, они оказывают на него укрепляющее и закаливующее действие. Однако передозировка может вызвать тяжелые ожоги, привести к повреждению макромолекул, появлению мутаций. Пигмент (загар), образующийся под кожей при облучении, являясь продуктом фотохимических реакций, защищает организм от избыточного действия ультрафиолетовых лучей. Искусственным источником УФ-лучей является ртутно-кварцевая лампа. Она применяется в лечебно-профилактических целях (облучение людей, животных), для дезинфекции помещений (бактерицидное действие).

ИК-излучение проникает в тело на глубину до 2 см и вызывает местный разогрев.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Может ли абсолютно черное тело ярко светиться? При каких условиях? Как формулируется закон Стефана — Больцмана? Закон Вина?
2. Какую гипотезу выдвинул М. Планк для вывода закона распределения энергии в спектре абсолютно черного тела? Чем отличаются взгляды М. Планка и А. Эйнштейна на проблему квантования?
3. Какие законы фотоэффекта противоречат классической электродинамике? В чем состоит это противоречие?
4. Покажите, что уравнение Эйнштейна для фотоэффекта непосредственно следует из закона сохранения энергии при определенных допущениях. Каковы эти допущения?
5. Используя интернет-ресурсы, подготовьте сообщение на тему «Применение внешнего фотоэффекта».
6. Что такое дисперсия света? Как возникает радуга? Изобразите схематически ход лучей при возникновении радуги.
7. Каковы следствия избирательного поглощения света веществом? При ответе используйте видеозапись эксперимента по поглощению света растворами (<http://www.youtube.com/watch?v=h9sbxtq6k3k>).

8. Выразите энергию и импульс фотона через частоту и длину волны. Объясните происхождение светового давления на основе квантовой теории. Почему отличается давление света на черную поверхность от давления на зеркальную?

9. Подготовьте аннотированный список интернет-ресурсов по теме «Биологическое действие света» (5—7 источников).

§ 63. Ядерная модель атома

Одну из первых моделей строения атома предложил в 1903 г. Дж. Дж. Томсон (рис. 114). Он предположил, что атом имеет форму шара; положительный заряд распределен равномерно по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него. Радиус атома должен быть равен примерно 10^{-10} м. Эта величина оценивалась по известным расстояниям между центрами атомов в кристаллических решетках твердых тел.

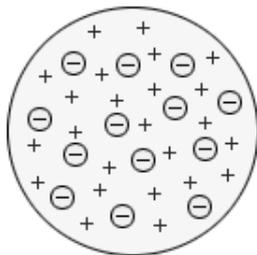


Рис. 114

Томсон считал, что периодическая повторяемость химических свойств атомов и спектральные закономерности получают свое объяснение, если будут найдены радиусы концентрических электронных оболочек внутри положительно заряженного шара, число электронов на каждой оболочке и закономерности их заполнения.

Новая модель атома была предложена Э. Резерфордом в результате проделанных им и его сотрудниками опытов по изучению рассеяния быстрых заряженных частиц при прохождении через тонкие слои вещества. Было обнаружено, что в основном альфа-частицы (ионы гелия) проникают через тонкие металлические пластины почти без отклонения от прямолинейного пути. И лишь очень небольшая их часть испытывает отклонения на большие углы. В среднем одна из 8000 альфа-частиц рассеивается в направлении, обратном направлению первоначального движения.

Резерфорд предположил, что рассеяние альфа-частиц на большие углы объясняется тем, что положительный заряд в атоме не распределен равномерно в шаре радиусом 10^{-10} м, а сосредоточен в центральной части атома в области значительно меньших размеров.

В этой центральной положительно заряженной части атома — атомном ядре — сосредоточена почти вся масса атома (рис. 115). По расчетам Резерфорда, радиус ядра примерно 10^{-15} м. Атом же устроен подобно планетарной системе. Как вокруг Солнца на больших расстояниях от него обращаются планеты, так вокруг атомного ядра обращаются электроны. Радиус орбиты самого удаленного от ядра электрона и есть радиус атома. Такая модель строения атома была названа *планетарной* или *ядерной* моделью.

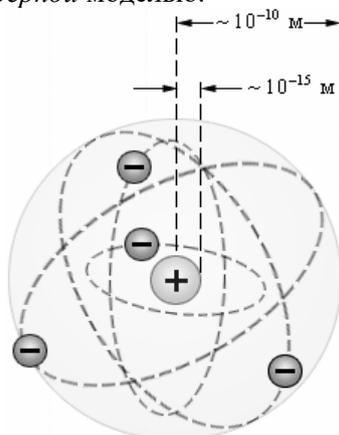


Рис. 115

Однако атомные системы отличаются от планетарных систем физической природой сил, удерживающих планеты и электроны на их орбитах: планеты притягиваются к звездам силами всемирного тяготения, а во взаимодействии электронов с атомным ядром основную роль играют силы кулоновского притяжения разноименных электрических зарядов.

Ядерная модель атома хорошо объясняет основные закономерности рассеяния заряженных частиц. Так как большая часть пространства между атомным ядром и электронами пуста, то быстрые заряженные частицы могут почти свободно проникать через слои вещества, содержащие несколько тысяч слоев атомов.

При столкновении с электроном альфа-частица практически не рассеивается, так как ее масса примерно в 8000 раз больше массы электрона. Однако в том случае, когда альфа-частица пролетает вблизи одного из ядер, под действием электрического поля атомного ядра может произойти ее рассеяние на любой угол до 180° . Но из-за малых размеров ядра по сравнению с размерами атома такие события происходят весьма редко.

§ 64. Квантовые постулаты Бора

Ядерная модель атома позволила объяснить результаты опытов по рассеянию альфа-частиц в веществе, но встретилась с другой принципиальной трудностью: законы движения электронов в атоме Резерфорда противоречили законам электродинамики.

Как известно, любое ускоренное движение электрических зарядов сопровождается излучением электромагнитных волн. Движение по окружности является ускоренным движением, поэтому электрон в атоме должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Это должно приводить к уменьшению энергии электрона, постепенному его приближению к атомному ядру и падению на ядро.

Таким образом, атом, состоящий из атомного ядра и обращающихся вокруг него электронов, согласно законам классической физики, неустойчив. Он может существовать лишь короткое время, за которое электроны израсходуют всю свою энергию на излучение и упадут на ядро (10^{-8} с). Но в действительности атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии не излучают свет.

Первый шаг на пути разрешения противоречий между теорией и результатами эксперимента в физике атома был сделан в 1913 г. Н. Бором. Свои представления о механизме излучения и поглощения света атомом он сформулировал в виде следующих постулатов.

Первый постулат (постулат стационарных состояний): атомная система может находиться только в некоторых состояниях, в которых не происходит излучения, хотя при этом заряженные частицы в атоме движутся с ускорением. Такие состояния называются стационарными состояниями атома.

Второй постулат (правило частот): любое испускание или поглощение энергии атомом происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. При переходе атома из стационарного состояния с энергией E_n в состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, частота которого определяется уравнением:

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где h — постоянная Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с).

Третий постулат (правило квантования орбит): стационарным состояниям соответствует движение электрона по круговым орбитам определенного радиуса r . При движении по этим орбитам момент импульса L принимает дискретные, квантовые значения:

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, m$ и v — масса и скорость электрона.

Таким образом, Бор впервые применил в теории атома идею квантования, согласно которой физические величины (энергия, момент импульса и др.) могут принимать лишь ряд строго определенных дискретных значений. Согласно теории Бора атом может поглощать и излучать энергию не непрерывно, а порциями (квантами), равными разности энергий, соответствующих стационарным состояниям. Данный факт был подтвержден опытным путем.

§ 65. Элементарная теория атома водорода

Рассмотрим применение теории Бора к атому водорода — простейшему атому с одним электроном. Ядро атома (протон) можно считать неподвижным, поскольку его масса в 1836 раз превышает массу электрона. Электронные орбиты примем за круговые. Между электроном и протоном действует сила кулоновского притяжения

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Она сообщает электрону центростремительное ускорение, удерживая его на орбите радиуса r . По второму закону Ньютона

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}.$$

Кроме того, согласно третьему постулату Бора разрешенными являются орбиты, удовлетворяющие условию

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}.$$

Совместное решение последних двух уравнений позволяет найти выражение для скорости электрона

$$v = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h}$$

и радиуса стационарных орбит

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}.$$

Радиусы боровских орбит пропорциональны n^2 . Радиус первой орбиты $r_1 = 0,0529$ нм часто используют в атомной физике как единицу длины (боровский радиус, он же является размером атома водорода в основном состоянии).

Определим энергию атома водорода. Она складывается из кинетической энергии движущегося электрона (ядро считаем покоящимся) и потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром:

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Подставляя выражения для v и r , получим:

$$E = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}.$$

Энергия принимает отрицательные значения, что связано с выбором начала отсчета потенциальной энергии: $E_p \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$. Как показывают расчеты, в основном состоянии $E_1 = -13,56$ эВ. Значение E_1 совпадает с работой ионизации, равной энергии связи электрона в атоме (чтобы ионизировать атом водорода, нужно перевести электрон с уровня E_1 на уровень E_∞).

В соответствии с теорией Бора величины v , r , L и E являются квантовыми: в зависимости от значения главного квантового числа n они принимают ряд дискретных значений.

В развитии современных представлений о строении атома большую роль сыграли экспериментальные данные о спектрах излучения. Спектры невзаимодействующих атомов состоят из отдельных линий, сгруппированных в серии. *Спектральной серией* называется совокупность линий, положение которых в спектре подчиняется определенной закономерности. Наиболее отчетливо это проявляется в спектре простейшего из атомов — атома водорода.

Первой была обнаружена и изучена серия линий атомарного водорода в видимой и близкой ультрафиолетовой областях (Бальмер, 1885 г.). Частоты, соответствующие линиям этой серии, выражаются формулой

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где c — скорость света, $R = 3,28985 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ — постоянная Ридберга, вычисленная из опытных данных, k — целое число, принимающее значения 3, 4, 5, ... Каждому значению k соответствует одна линия серии.

Позднее были обнаружены серии линий и в других областях спектра атомарного водорода. Все они могут быть представлены обобщенной формулой Бальмера — Ридберга

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где n — целое число, постоянное для каждой серии, а k — ряд целых чисел начиная с $k = n + 1$. Значению $n = 1$ соответствует серия Лаймана (УФ-область), значениям $n = 3$ и $n = 4$ — серия Пашена и серия Брэкета (ИК-область) и т.д. Для энергии квантов излучения атома водорода можно записать следующую формулу:

$$h\nu = hR \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Дискретность в структуре атомных спектров указывает на наличие дискретности в строении самих атомов.

Энергию атома водорода в стационарном состоянии удобно представить так:

$$E = -\frac{hR}{n^2}.$$

Целое число n , определяющее энергию атома, называется *главным квантовым числом*. Каждому значению n соответствует свое значение энергии E_n . С возрастанием n энергия атома увеличивается. Состояние атома с минимальным значением энергии E_1 ($n = 1$) называется основным или нормальным, а состояния, в которых энергия E_n соответствует значениям $n > 1$, — возбужденными. Основное состояние является устойчивым, а возбужденные — неустойчивыми. Совокупность значений энергии атома можно представить системой энергетических уровней. Уровни расположены неравномерно: по мере увеличения n они сгущаются. Атом испускает фотон, переходя с более высокого на нижерасположенный уровень. Переход на более высокий уровень соответствует поглощению фотона. На диаграмме, приведенной на рисунке 116, показаны положения энергетических уровней атома водорода и переходы, связанные с испусканием (по сериям спектральных линий). Группа переходов на основной уровень дает излучение, соответствующее линиям серии Лаймана. Изменения энергии при этих переходах велики (серия Лаймана располагается в УФ-области). Серия Бальмера возникает при переходах на уровень, для которого $n = 2$ (в области видимого света), а серия Пашена — при переходах на уровень с $n = 3$ (ИК-область) и т.д.

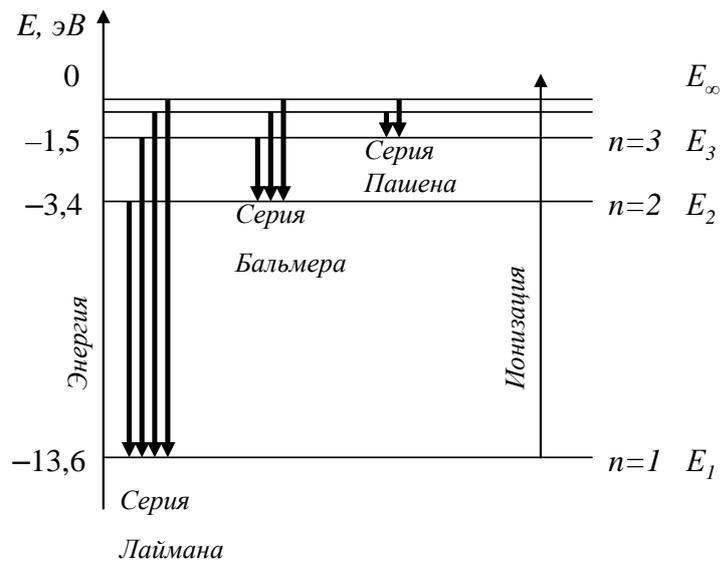


Рис. 116

§ 66. Трудности теории Бора. Основные идеи и представления квантовой механики

Объяснение спектра водорода было серьезным доводом в пользу теории Бора. Однако попытка сочетания принципиально новых квантовых законов (квантование энергии и момента импульса системы при переходах из одного стационарного состояния в другое) с классическими законами (движение электронов по стационарным орбитам происходит в соответствии с классическими законами механики и электродинамики) оказалась в конечном счете бесперспективной.

После нескольких первых успехов обнаружились серьезные трудности для дальнейшего развития теории Бора. Например, эта теория позволяла вычислить частоты спектральных линий атома водорода, но ничего не могла сказать об интенсивностях излучения тех или иных частот. Добившись успеха в объяснении спектра атома водорода, теория Бора не могла справиться с объяснением спектров более сложных атомов. Дальнейшее развитие физики показало, что трудности теории Бора были не случайными.

Для понимания основных свойств атомов и других микрообъектов оказался необходимым пересмотр многих фундаментальных физических представлений и понятий. К такому пересмотру физика подошла в результате открытия волновых свойств частиц вещества и соотношения неопределенностей. Основы новой теории, описывающей поведение микрочастиц с учетом их волновых свойств, были созданы в 1925—1926 гг. В. Гейзенбергом и Э. Шредингером. Этой теорией стала квантовая (волновая) механика.

Квантовая механика раскрывает два основных свойства вещества: квантованность внутриатомных процессов и волновую природу частиц. Область применения квантовой механики охватывает атомы, молекулы, твердые тела, явления ядерной физики. Вся современная теоретическая химия основана на квантовой механике. Квантовомеханический подход широко используется также в биофизике, биохимии, молекулярной биологии.

Квантовая механика лишена наглядности, характерной для классической механики. Образы привычного для нас макромира становятся непригодными для описания явлений, происходящих в микромире. Особенно сильно это проявляется в отношении несвободных частиц, находящихся во взаимодействии с другими частицами (электроны в атоме, молекуле, кристалле и т.д.). Структура Периодической системы элементов может быть понята только с позиций квантовой механики. Система идей квантовой механики была подтверждена данными химии и блестяще оправдала себя при объяснении валентности, энергии связи, устойчивости состояний.

§ 67. Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей

В 1924 г. Луи де Бройль высказал гипотезу о том, что сочетание волновых и корпускулярных свойств является общим свойством любых материальных объектов, а не только света.

Это значит, что любое тело массой m , движущееся со скоростью v , может быть охарактеризовано длиной волны λ и частотой ν . По предположению де Бройля в нерелятивистском приближении ($v \ll c$):

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Волновые свойства электронов были экспериментально обнаружены в опытах по дифракции электронов на кристаллах в 1927 г. Вид рассеянного пучка электронов такой же, как если бы падало электромагнитное излучение. В настоящее время обнаружены волновые свойства у других элементарных частиц, а также атомов и молекул.

Волновыми свойствами, согласно представлениям де Бройля, должны обладать любые материальные объекты. Но почему же эти свойства не обнаруживаются в опытах с макроскопическими телами? Для ответа на этот вопрос вычислим, например, дебройлевскую длину волны тела массой 1 г, движущегося со скоростью 0,5 м/с:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34}}{10^{-3} \cdot 0,5} \text{ м} \approx 10^{-30} \text{ м}.$$

Значение длины волны получилось на 20 порядков меньше размеров атома. Волновые эффекты такой малости невозможно обнаружить.

Таким образом, имеет место корпускулярно-волновая двойственность свойств частиц. Идея корпускулярно-волнового дуализма заключается не в механическом соединении двух взаимоисключающих моделей, а в признании такой сложности свойств микрообъектов, для полного описания которых непригодны одни корпускулярные или только одни волновые представления. Описание свойств микрообъектов с использованием представлений о локализованных в пространстве частицах или о непрерывных волнах является упрощением реальности.

Обнаружение волновых свойств частиц привело к открытию фундаментального закона, управляющего всеми явлениями мира микрочастиц, — *соотношения неопределенностей*. Оно было открыто в 1927 г. В. Гейзенбергом. Согласно этому соотношению положение (координаты) и импульс (или скорость) движущейся частицы могут быть заданы одновременно лишь с ограниченной степенью точности, т.е. имеют некоторую неопределенность. Произведение неопределенности координаты Δx частицы на неопределенность проекции импульса Δp_x на данное направление не может быть меньше постоянной Планка:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h.$$

Чем точнее определен импульс частицы, тем более неопределенной является ее координата. Учитывая связь между импульсом и энергией, можно получить соотношение неопределенности для энергии E и времени τ :

$$\Delta E \cdot \Delta \tau \geq \frac{h}{2\pi},$$

где ΔE — неопределенность энергии некоторого состояния системы и $\Delta \tau$ — время его существования. Чем больше время жизни системы, тем точнее определена ее энергия. Например, строго определенная энергия ($\Delta E \rightarrow 0$) соответствует только основному состоянию атома, в котором он может пребывать как угодно долго ($\Delta \tau \rightarrow \infty$). В состоянии с малым временем жизни неопределенность в энергии достаточно велика и соответствующий энергетический уровень «размыт», что приводит к неопределенности в частоте спектральных линий. Наблюдаемые на опыте спектральные линии имеют поэтому конечную (естественную) ширину.

Соотношение неопределенности — прямое следствие волновых свойств микрочастиц. Отражая своеобразие микромира, оно свидетельствует о том, что возможности описания поведения микрочастиц с помощью понятий классической физики ограничены. В квантовой механике представление о точных значениях координаты, мгновенной скорости микрочастицы и определяемой ими траектории (в классическом понимании) теряет смысл. Законы сохранения импульса, энергии в квантовой механике выполняются строго.

§ 68. Уравнение Шрёдингера

Состояние в квантовой механике описывается с помощью некоторой функции координат и времени — *волновой функции* ψ (пси-функции), определяющей поведение частицы. Конкретный вид ψ -функции (ее математическое выражение) определяется состоянием частицы, характером поля, в котором она движется. Физический смысл имеет не сама ψ -функция, а квадрат ее модуля, $|\psi|^2$, который характеризует вероятность пребывания частицы в определенном месте пространства. Зная, как меняется пси-функция от точки к точке, можно судить о том, где вероятнее всего можно встретить частицу. Исходя из этого, частицу удобно представить как бы «размазанной» в определенной области пространства в виде своеобразного облака переменной плотности. В атомной физике пользуются понятием электронного облака, распределенного в атоме или молекуле. Плотность электронного облака является непосредственной мерой вероятности пребывания электрона в определенной точке.

Вид ψ -функции в каждом конкретном случае можно получить путем решения *волнового уравнения Шрёдингера*, которое связывает ψ -функцию с массой m микрочастицы, ее полной энергией E и потенциальной энергией E_p :

$$\Delta \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - E_p) \psi = 0,$$

где

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}.$$

Данное уравнение не содержит в качестве параметра время, поэтому оно описывает стационарные состояния.

Приняв уравнение Шрёдингера как математическое выражение фундаментальных свойств микросистем, можно получить ряд замечательных следствий, адекватно отражающих объективно существующие закономерности. В частности, можно вывести правила квантования полной энергии замкнутой системы. Оказывается, что уравнение Шрёдингера имеет решение не при любых значениях полной энергии системы, а лишь при некоторых, называемых собственными значениями. Совокупность собственных значений энергии называется спектром.

Таким образом, идея квантованности энергетических состояний атома, которая у Бора была гениальной догадкой и формулировалась в качестве постулата, оказывается следствием уравнения Шрёдингера.

У частицы, заключенной в результате взаимодействия с другими частицами в ограниченный объем пространства, спектр собственных значений энергии дискретный. Докажем это на примере частицы, находящейся в потенциальной яме (так называется область пространства, где потенциальная энергия минимальна).

Рассмотрим самый простой случай — одномерное движение частицы в потенциальной яме. Если волновая функция зависит только от одной координаты x , то уравнение Шрёдингера примет вид:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - E_p)\psi = 0.$$

Пусть расстояние между стенками ямы равно a и стенки ямы бесконечно высокие: внутри ямы $E_p = 0$, а за ее пределами $E_p = \infty$ (рис. 117).

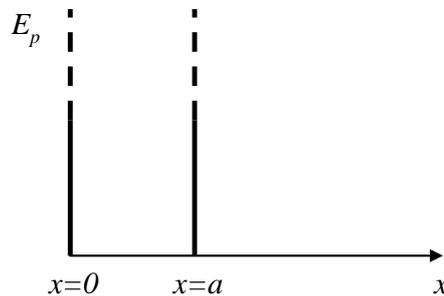


Рис. 117

В этом случае частица испытывает отражение от стенок и попасть за пределы ямы не может. Пси-функция за пределами ямы и на ее границах равна нулю:

$$\psi(0) = \psi(a) = 0.$$

Так как внутри ямы $E_p = 0$, то уравнение Шрёдингера в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}E\psi = 0.$$

Обозначив

$$k^2 = \frac{8\pi^2m}{h^2}E,$$

получим уравнение, очень похожее на уравнение гармонического осциллятора:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + k^2\psi = 0.$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$\psi(x) = A\sin(kx) + B\cos(kx),$$

в чем легко убедиться подстановкой.

Используя граничное условие $\psi(0)=0$, получим $0 = B$; следовательно,

$$\psi(x) = A \sin(kx).$$

Используя второе граничное условие $\psi(a)=0$, получим

$$A \sin(ka) = 0,$$

что возможно лишь в том случае, когда

$$ka = n\pi,$$

где n — целое число, не равное нулю. Возведя обе части этого соотношения в квадрат и расписав k , получим:

$$E = \frac{n^2 h^2}{8a^2 m},$$

где $n=1, 2, 3, \dots$

Итак, в замкнутой системе стационарные состояния, т.е. состояния, в которых полная энергия со временем не меняется, возможны только при дискретных значениях полной энергии. В этом первое отличие квантовой картины мира от классической.

Второе отличие состоит в следующем. Если согласно классическим представлениям частица может с одинаковой вероятностью находиться в любой точке внутри потенциальной ямы, то согласно квантовой механике вероятность ее нахождения в разных точках различна. Эта вероятность определяется квадратом пси-функции. На рисунке 118, *a* изображен график функции $\psi(x)$, а на рисунке 118, *б* — график функции $\psi^2(x)$ для разных значений главного квантового числа $n = 1, 2, 3$. Как видно, вероятность нахождения частицы внутри потенциальной ямы на разных расстояниях от ее стенок неодинакова. При $n = 1$ вероятность нахождения частицы в середине ямы максимальна, при $n = 2$ равна нулю. Таким образом, классическая и квантовая физика дают разные предсказания о локализации частицы в пространстве.

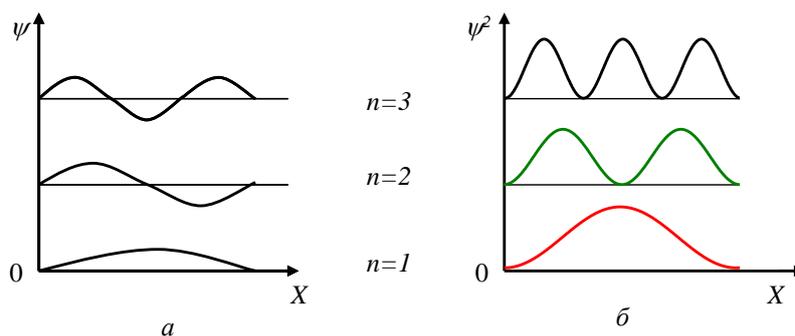


Рис. 118

Для электрона в атоме отдельная волновая функция определяет орбиталь, характеризующая распределение электронной плотности вокруг ядра. Поэтому под орбиталью понимают область пространства, где вероятность пребывания электрона достаточно велика (~90%). Каждому состоянию электрона в атоме соответствует своя орбиталь с характерными очертаниями и ориентацией. Так, в невозбужденном атоме водорода электронное облако — сферическое образование с размытой границей и максимальной плотностью на расстоянии 0,053 нм от ядра, что соответствует радиусу первой боровской орбиты. Знать форму и ориентацию орбиталей важно для понимания характера химической связи. Теоретический расчет электронной плотности по остову молекулы является главной задачей квантовой химии.

Уравнение Шрёдингера является фундаментальным уравнением квантовой механики и имеет для нее такое же значение, как законы Ньютона для классической механики. Оно не выводится, а составляется на основе аналогии с уравнениями для волновых процессов иной природы. Решение уравнения Шрёдингера — сложная математическая задача; это уравнение в большинстве случаев решается лишь приближенно. Для атома водорода оно решается точно.

Квантовая теория при определенных условиях переходит в классическую. Действительно, при больших значениях главного квантового числа n энергия частицы увеличивается, однако скачок энергии между соседними энергетическими уровнями становится малым по сравнению с энергией, и ее квантование не заметно.

§ 69. Квантовые числа

Состояние электрона в атоме определяется совокупностью четырех квантовых чисел.

Главное квантовое число $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ определяет энергию электрона, обусловленную его взаимодействием с ядром. Каждому значению n соответствует свой энергетический уровень. С ростом n квантованные значения энергии увеличиваются, растет размер электронного облака.

В классической физике момент импульса частицы, обращающейся вокруг некоторой оси, — это вектор, направленный вдоль оси вращения. Известен его модуль и три его проекции на оси координат. Иной результат дает квантовая механика.

Любая вращающаяся система в квантовой механике может быть охарактеризована одновременно только двумя параметрами момента импульса — его модулем и одной из трех проекций момента импульса на какую-либо координатную ось. Две другие проекции не могут быть определены. Это значит, что направление вектора момента импульса системы в квантовой механике оказывается неопределенным, но проекция вектора на одно из выбранных направлений в пространстве может быть найдена.

Модуль момента импульса любой системы принимает только дискретный ряд значений, определяемых формулой:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где $l = 1, 2, 3, \dots$ называется *орбитальным квантовым числом* ($\hbar = h/2\pi$).

Проекция L_z момента импульса на некоторое избранное в пространстве направление (например, на направление вектора индукции магнитного поля) также принимает дискретный ряд значений, определяемых уравнением:

$$L_z = m\hbar,$$

где m — *магнитное квантовое число*, принимающее значения $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ (всего значений $2l + 1$).

Так как проекция вектора не может быть больше его модуля, то из двух последних уравнений следует, что магнитное квантовое число m не может превышать орбитальное квантовое число l , т.е. $|m| \leq l$.

Сравнение этих формул с уравнением

$$E = \frac{n^2 h^2}{8a^2 m}$$

не позволяет обнаружить связи полной энергии системы с ее моментом импульса или проекцией момента импульса на одну из координатных осей. Отсутствие прямой связи полной энергии системы с ее моментом импульса — одна из замечательных особенностей микромира, обнаруженная квантовой механикой. Однако полная энергия и момент импульса системы не являются все же полностью независимыми. Квантовая механика налагает одно ограничение на момент импульса: для любой системы уравнение Шрёдингера имеет решения лишь для значений орбитального квантового числа, удовлетворяющих условию

$$l \leq n - 1,$$

где n — главное квантовое число. Итак, $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$.

Спиновое квантовое число m_s определяет возможные ориентации спина — собственного момента импульса (и связанного с ним спинового магнитного момента) электрона. На основе опытов установлено, что таких ориентаций может быть две. Спиновое квантовое число m_s может принимать два полуцелых значения $\pm 1/2$, а проекция спина на выбранное направление — значения $\pm 1/2 \hbar$. В принятом выражении «спин $\pm 1/2$ » речь идет не о самом спине, а о его проекции $\pm 1/2 \hbar$, т.е. в единицах \hbar .

Четыре квантовых числа n, l, m и m_s достаточны для полной характеристики электрона в атоме. По принципу Паули в атоме не может быть двух электронов с одинаковым набором квантовых чисел. Значит, на одной орбитали (с определенными значениями n, l, m) может находиться не более двух электронов с противоположными спинами. Одиночный (неспаренный) электрон на орбитали имеет нескомпенсированный спин и спиновой магнитный момент. Совокупность электронов с одинаковыми значениями n и l образует *подслой*. Так как m принимает не более $2l + 1$ значений, а m_s — не более двух, то число электронов в подслое не пре-

вышает $2(2l + 1)$. При заданном n число l принимает значения от 0 до $n - 1$, поэтому максимальное количество электронов в каждом слое можно найти, вычислив сумму

$$\sum_{l=0}^{l=n-1} 2(2l + 1) = 2n^2.$$

В заполненных слоях и подслоях спины электронов (как и спиновые магнитные моменты) попарно компенсируются, и значения полного спина и спинового магнитного момента равны нулю.

В атоме может существовать несколько электронных состояний с одинаковой энергией (*вырожденные состояния*). Вырождение исчезает при воздействии на атом магнитного и электрического полей. В состояниях с одним и тем же n , но разными l , m и m_s электроны по-разному взаимодействуют с внешними полями, и значения энергии, соответствующие этим состояниям, становятся разными.

Распределение электронов в атоме подчиняется принципу Паули и принципу минимума энергии (электрон занимает состояние с наименьшей энергией). Энергия электронных состояний в основном определяется квантовыми числами n и l . Переход атома из одного квантового состояния в другое сопровождается изменением квантовых чисел и перестройкой его электронного облака.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Схематично представьте модели строения атома по Томсону, Резерфорду, Бору; прокомментируйте схемы.

2. Как объясняется происхождение линейчатых спектров теорией Бора? Поясните происхождение спектральных серий в линейчатом спектре водорода с помощью представлений о переходах электронов с одной орбиты на другую и с помощью энергетической диаграммы.

3. Перечислите трудности теории Бора, в чем их причина?

4. При осмыслении и систематизации основных идей и представлений квантовой механики предлагаем Вам опираться на материал научно-популярного фильма «Микромир, квантовая механика» (<https://www.youtube.com/watch?v=Xvie3RnJu-4>). На основе просмотренного фильма заполните таблицу.

Знаю	Узнал(а) из фильма	Интересно
Перечислите известные Вам квантовомеханические идеи и представления	Перечислите неизвестные Вам ранее квантовомеханические идеи и представления, о которых Вы узнали из фильма	Отметьте факты, которые для Вас являются интересными, неожиданными

5. В чем состоит гипотеза де Бройля? Соотношение неопределенностей Гейзенберга? Можно ли утверждать, что электроны в атоме движутся по определенным орбитам? Обоснуйте свой ответ.

6. Какие сведения о квантовомеханической системе можно получить на основании решения уравнения Шрёдингера? Какие физические характеристики системы определяются главным квантовым числом, орбитальным квантовым числом и магнитным квантовым числом?

7. В чем физический смысл принципа Паули? Какие частицы подчиняются/не подчиняются принципу Паули? Какими правилами определяется порядок заполнения электронных оболочек атомов? Чем объясняется периодическая повторяемость химических свойств элементов?

§ 70. Состав атомных ядер. Ядерные силы

Атомное ядро — сложное образование; оно состоит из ядерных частиц (нуклонов): *протонов* p и *нейтронов* n . Протон имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и обладает массой, примерно в 1836 раз большей массы электрона. Нейтрон — электрически нейтральная частица с массой, примерно равной массе протона.

Количество протонов в ядре нейтрального атома совпадает с числом электронов z в его оболочке (z — порядковый номер элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева). Заряд ядра, определяющий индивидуальность атома, равен $+ze$, т.е. заряду входящих в него протонов.

Массы атомов мало отличаются от массы их ядер. *Массовым числом* A называется целое число, ближайшее к массе атома, выраженной в атомных единицах массы (а.е.м.). Причем

$$A = Z + N,$$

где Z — число протонов в ядре, а N — число нейтронов (так как $m_p \approx m_n = 1$ а.е.м.). Химический элемент X принято обозначать с указанием слева сверху массового числа A и слева внизу — зарядового числа Z , т.е. символом A_ZX (например, ${}^{12}_6C$). Ядра с одним и тем же Z , но разными A (разным числом нейтронов) называются *изотопами*. Большинство элементов имеет несколько изотопов. Например, самый легкий изотоп водорода — протий 1_1H (его ядром является один протон). Тяжелый изотоп водорода — дейтерий 2_1H (его ядро содержит один нейтрон и один протон). Сверхтяжелый изотоп — тритий 3_1H . Изотопы обладают сходными химическими свойствами.

Ядра с одинаковыми A , но разными Z называются *изобарами*. Например, 3_1H и 3_2He .

Устойчивость ядер означает, что между нуклонами существуют силы притяжения, превышающие кулоновское отталкивание. Силы гравитационного притяжения не могут обеспечить устойчивость ядра, так как они в 10^{36} раз меньше кулоновских. Внутри атомных ядер действуют *ядерные силы* (другое название этого взаимодействия — *сильное взаимодействие*). Перечислим их свойства:

1. Они больше всех остальных взаимодействий между нуклонами. Если ядерные силы принять за 1, то электромагнитные составят $\sim 10^{-2}$, а гравитационные — $\sim 10^{-36}$. Величиной ядерных сил определяется большая плотность атомного ядра ($\sim 10^{17}$ кг/м³).

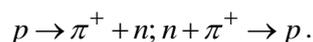
2. Ядерные силы являются короткодействующими. На расстояниях не больших 10^{-15} м сильное взаимодействие нуклонов значительно превосходит электромагнитное и гравитационное, но с увеличением расстояния между нуклонами очень быстро убывает.

3. Ядерные силы не центральные, т.е. источником не являются точки.

4. Для сильного взаимодействия характерна зарядовая независимость (не зависят от зарядов нуклонов).

5. Ядерные силы обладают свойством насыщения. Нуклон способен взаимодействовать только с определенным количеством других нуклонов.

Свойство насыщения ядерных сил делает их в некоторой мере сходными с силами связи атомов в молекулах. Ковалентная связь между атомами в молекуле возникает за счет постоянного обмена валентными электронами. Х. Юкава в 1935 г. показал, что все основные свойства ядерных сил можно объяснить, приняв, что нуклоны обмениваются между собой частицами с массой немногим более 200 электронных масс. Такие частицы были обнаружены экспериментально в 1947 г. Они получили название *пи-мезонов* или *пионов*. Существуют положительный, отрицательный и нейтральный пи-мезоны. Мезоны не являются составными частями протонов и нейтронов, а испускаются и поглощаются ими подобно тому, как атомы испускают и поглощают кванты электромагнитного излучения — фотоны. Протон, испустивший положительный пи-мезон, превращается в нейтрон, а нейтрон после захвата пи-мезона превращается в протон:



Таким образом, пи-мезоны являются квантами поля сильного взаимодействия, или квантами ядерного поля. В принципе возможны четыре типа обмена пионами:

$$p \leftrightarrow p + \pi^0; n \leftrightarrow n + \pi^0; p \leftrightarrow n + \pi^+;$$

$$n \leftrightarrow p + \pi^-.$$

Все эти процессы обеспечивают сильное взаимодействие и тем самым — устойчивость ядра.

§ 71. Энергия связи ядра

Точные измерения масс атомных ядер показали, что масса любого устойчивого ядра, содержащего Z протонов и N нейтронов, меньше суммы масс Z свободных протонов и N нейтронов:

$$m_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

Из закона взаимосвязи массы и энергии следует, что полная энергия свободных протонов и нейтронов должна быть больше полной энергии составленного из них ядра. Для разделения атомного ядра на составляющие его нуклоны нужно затратить энергию $\Delta E_{\text{св}}$, равную разности между полной энергией свободных протонов и нейтронов и полной энергией ядра:

$$\Delta E_{\text{св}} = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - m_{\text{я}} c^2 = \Delta m c^2.$$

Минимальная энергия $\Delta E_{\text{св}}$, которую нужно затратить для разделения атомного ядра на составляющие его нуклоны, называется *энергией связи ядра*. Эта энергия расходуется на совершение работы против действия ядерных сил притяжения между нуклонами.

При соединении протонов и нейтронов в атомное ядро происходит освобождение энергии; освобождаемая энергия равна энергии связи ядра. Эта энергия освобождается за счет работы сил ядерного притяжения между нуклонами.

Отношение энергии связи ядра $\Delta E_{\text{св}}$ к числу нуклонов A в ядре называется *удельной энергией связи* нуклонов в ядре. Эта величина в разных атомных ядрах неодинакова. Сначала с ростом массового числа A она увеличивается от 1,1 МэВ/нуклон у ядра дейтерия до 8,8 МэВ/нуклон у железа, а далее с ростом массового числа постепенно убывает и снижается до 7,6 МэВ/нуклон у урана. Зависимость удельной энергии связи нуклона в ядре от массового числа представлена на рисунке 119.

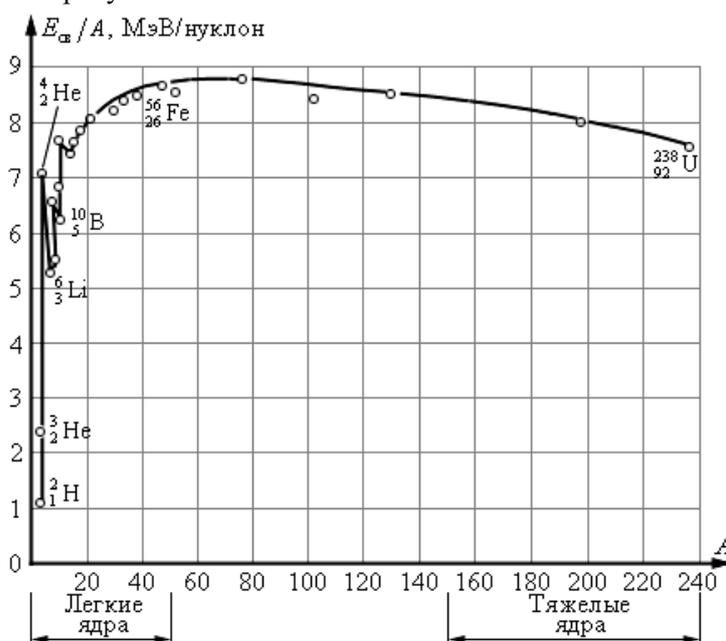


Рис. 119

Из графика видно, что существует два пути освобождения энергии: синтез легких элементов и деление тяжелых. Отметим, что наиболее выгодной в отношении энергетического выхо-

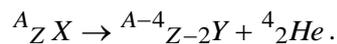
да является реакция синтеза ядер протия или дейтерия, поскольку, как это следует из графика, в данном случае разность энергий связи синтезируемого ядра и исходных ядер будет наибольшей.

Удельная энергия связи нуклонов в атомных ядрах в сотни тысяч раз превосходит энергию связи электронов в атоме.

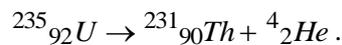
§ 72. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Не всякое атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов, удерживаемых ядерными силами притяжения, может существовать неограниченно долго. Многие атомные ядра оказываются способными к самопроизвольным превращениям в другие атомные ядра. Устойчивыми являются лишь те из них, которые обладают минимальным запасом полной энергии среди всех ядер, в которые данное ядро могло бы самопроизвольно превратиться. Различают *стабильные* и *нестабильные* ядра. Стабильные ядра не меняют своего состава со временем. Нестабильные — самопроизвольно превращаются в другие ядра с другой массой и другим зарядом. Данные процессы сопровождаются испусканием α -частиц (ядер гелия), β -частиц (электронов или позитронов), нейтрино (безмассовых частиц), γ -квантов (электромагнитных волн; λ от 10^{-14} до 10^{-10} м).

Альфа-распадом называется самопроизвольный распад атомного ядра на альфа-частицу и ядро-продукт. Альфа-радиоактивны почти все ядра тяжелых элементов с порядковым номером большим 82. При вылете α -частицы из ядра число протонов в ядре уменьшается на два и продукт альфа-распада оказывается ядром элемента с порядковым номером, на две единицы меньше исходного, массовое число ядра-продукта меньше массового числа исходного ядра на четыре единицы:



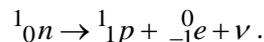
Например,



Начальная кинетическая энергия всех альфа-частиц, испускаемых ядрами одного изотопа, одинакова, или испускаются альфа-частицы с двумя-тремя разными значениями начальной кинетической энергии.

При альфа-распаде атомных ядер довольно часто часть энергии может пойти на возбуждение ядра-продукта. Ядро-продукт спустя короткое время после вылета α -частицы испускает один или несколько гамма-квантов и переходит в нормальное состояние.

Существует три типа *бета-распада*: электронный, позитронный и электронный захват. При *электронном β -распаде* внутри ядра протекает реакция превращения нейтрона в протон с испусканием электрона и нейтрино:

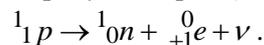


Причем внутри ядра электронов нет, они рождаются в результате реакции и сразу покидают ядра.

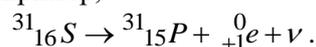
В результате превращения одного из нейтронов в протон заряд ядра увеличивается на единицу. Ядро-продукт оказывается ядром одного из изотопов элемента с порядковым номером в таблице Менделеева, на единицу большим порядкового номера исходного ядра. Массовое число ядра-продукта остается прежним, так как число нуклонов в ядре не изменяется. Например,



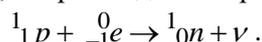
При *позитронном β -распаде* внутри ядра протекает реакция превращения протона в нейтрон с испусканием позитрона (частицы с массой, равной массе электрона и положительным зарядом, по модулю равным заряду электрона) и нейтрино:



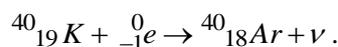
Массовое число ядра-продукта остается прежним, а порядковый номер в таблице Менделеева на единицу уменьшается. Например,



Ядра некоторых элементов время от времени захватывают свои электроны. Этот процесс, называемый *электронным захватом*, сопровождается превращением протона в нейтрон:



При этом массовое число ядра-продукта остается прежним, а зарядовое — уменьшается на единицу. Например,



Распад большого количества ядер любого радиоактивного изотопа подчиняется одному закону, который может быть выражен в следующей математической форме:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Это уравнение носит название *закона радиоактивного распада*. В нем N_0 означает начальное количество радиоактивных ядер в момент времени, с которого начинаются наблюдения ($t = 0$). Число ядер, не испытавших распада до некоторого произвольного момента времени t , обозначено N . Символом T обозначена постоянная величина, зависящая от типа радиоактивного изотопа. Эта постоянная называется *периодом полураспада*. Через промежуток времени, равный периоду полураспада, исходное количество радиоактивных ядер убывает вдвое. На рисунке 120 по оси ординат отложено количество радиоактивных ядер в момент времени t , время отсчитывается по оси абсцисс.

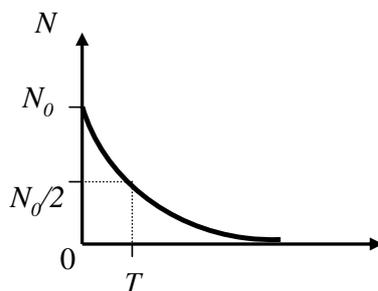
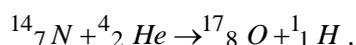


Рис. 120

§ 73. Ядерные реакции

Взаимодействие частицы с атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое с выделением вторичных частиц или гамма-квантов, называется *ядерной реакцией*. Первая ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. Он обнаружил, что при столкновении альфа-частиц с ядрами атомов азота образуются быстро движущиеся протоны:



Ядерные реакции могут протекать с выделением или поглощением энергии. Это определяется разностью масс частиц, вступающих в реакцию, и продуктов реакции.

Среди различных ядерных реакций особо большое значение в жизни современного человеческого общества имеют цепные *реакции деления* некоторых *тяжелых ядер*. В 1939 г. было установлено, что при попадании в ядро урана одного нейтрона ядро делится на две-три части. При этом освобождается около 200 МэВ энергии. На кинетическую энергию движения ядерных осколков приходится примерно 165 МэВ, остальную энергию уносят гамма-кванты. Несложно подсчитать, что выход энергии при делении всех ядер 1 кг урана составляет 80 тысяч миллиардов Дж. Это в несколько миллионов раз больше, чем выделяется при сгорании 1 кг каменного угля или нефти. Поэтому были предприняты поиски путей освобождения ядерной энергии в значительных количествах для использования ее в практических целях.

Впервые предположение о возможности осуществления цепных ядерных реакций высказал Ф. Жолио-Кюри в 1934 г. Он же в 1939 г. вместе с Х. Халбаном и Л. Коварски экспериментально обнаружил, что при делении ядра урана, кроме осколков-ядер, вылетают также 2—3 свободных нейтрона (рис. 121).

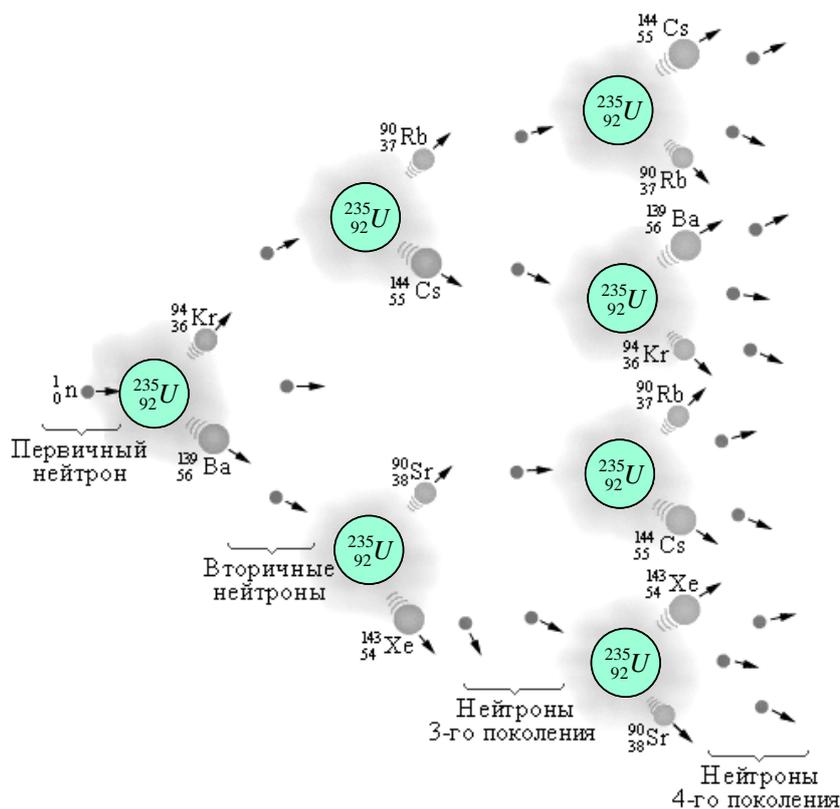


Рис. 121

При благоприятных условиях эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. Но нейтроны, освобождающиеся при делении ядер, способны вызывать деление лишь ядер изотопа урана с массовым числом 235. В природном уране всего лишь 0,7% приходится на изотоп с массовым числом 235 (основное содержание составляет уран с массовым числом 238, который захватывает быстрые нейтроны без деления). Поэтому первый возможный путь осуществления цепной реакции деления связан с разделением изотопов урана и получением в чистом виде в достаточно больших количествах изотопа ^{235}U , так как в образце малых размеров большинство нейтронов пролетает сквозь него, не попав ни в одно ядро. Минимальная масса урана, в котором может возникнуть цепная реакция, называется критической массой и составляет несколько десятков килограммов.

Простейшим способом осуществления цепной реакции в уране-235 является следующий: изготавливают два куска металлического урана, каждый с массой, несколько меньшей критической. При быстром соединении этих кусков развивается цепная реакция и выделяется колоссальная энергия. Температура урана достигает миллионов градусов, сам уран и любые другие вещества, находящиеся поблизости, превращаются в пар. Раскаленный газообразный шар быстро расширяется, сжигая и разрушая все на своем пути. Так происходит ядерный взрыв.

Использовать энергию ядерного взрыва в мирных целях очень трудно, так как выделение энергии при этом не поддается контролю. Управляемые цепные реакции деления ядер урана осуществляются в *ядерных реакторах*. Первыми ядерными реакторами были реакторы на медленных нейтронах. Большинство нейтронов, освободившихся при делении ядер урана, обладают энергией 1—2 МэВ. Скорости их при этом равны примерно 10^7 м/с, поэтому их называют быстрыми нейтронами. При таких энергиях нейтроны взаимодействуют с ядрами урана-235 и урана-238 примерно с одинаковой эффективностью. А так как ядер урана-235 мало, большая часть этих нейтронов поглощается ядрами урана-238 без деления, и цепная реакция не развивается. Нейтроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости теплового движения (около $2 \cdot 10^3$ м/с), называются медленными или тепловыми. Медленные нейтроны поглощаются ядрами урана-235 в 500 раз эффективнее, чем быстрые. Поэтому для осуществления цепной реакции в природном уране скорости нейтронов должны быть уменьшены до тепловых.

Для замедления нейтронов в реакторе (рис. 122) используются специальные вещества, называемые замедлителями. Ядра атомов вещества-замедлителя должны обладать сравнительно небольшой массой, так как при столкновении с легким ядром нейтрон теряет больше энергии, чем при столкновении с массивным ядром. Наиболее распространенными замедлителями являются обычная и тяжелая вода и графит.

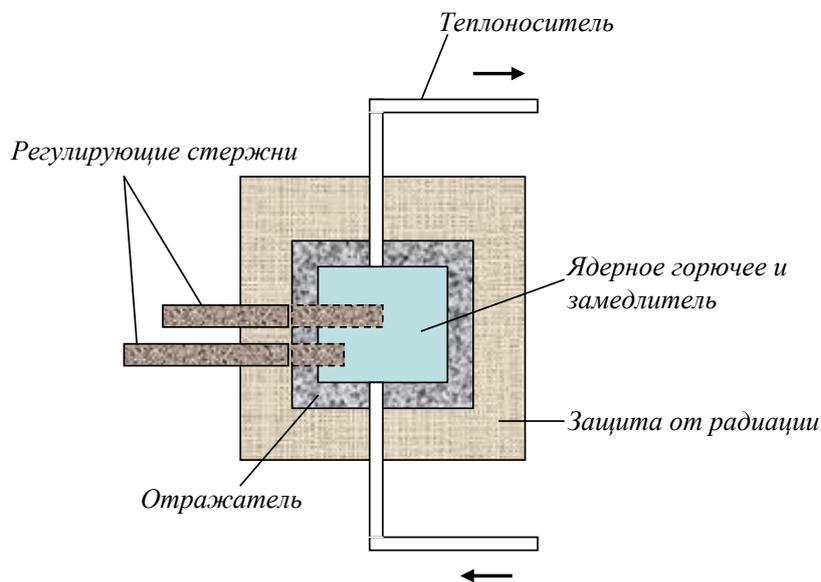


Рис. 122

Пространство, в котором протекает цепная реакция, называется активной зоной реактора. Для уменьшения утечки нейтронов активную зону реактора окружают отражателем нейтронов, отбрасывающим значительную часть вылетающих нейтронов внутрь активной зоны. Хорошим отражателем является бериллий.

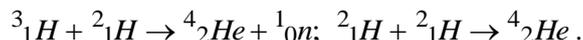
Управление реактором осуществляется с помощью специальных управляющих стержней, вводимых в активную зону реактора. Управляющие стержни изготавливаются из соединения бора и кадмия, эффективно поглощающих тепловые нейтроны.

Энергия за счет ядерных реакций освобождается не только в реакциях деления тяжелых ядер, но и при соединении легких атомных ядер.

Для соединения одноименно заряженных протонов необходимо преодолеть кулоновские силы отталкивания. Это возможно при достаточно больших скоростях сталкивающихся частиц, т.е. при высокой температуре 10^7 — 10^8 К (при таких температурах вещество — плазма). Необходимые условия для синтеза ядер гелия из протонов имеются в недрах звезд. На Земле термоядерная реакция синтеза осуществляется при термоядерных взрывах.

Синтез гелия из легкого изотопа водорода происходит при температуре около 10^8 К, а для синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода, дейтерия и трития требуется нагревание плазмы примерно до $5 \cdot 10^7$ К.

Возможные реакции:



При синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития выделяется энергия $4,2 \cdot 10^{11}$ Дж. Такая энергия выделяется при сжигании 10 т дизельного топлива. Запасы водорода на Земле практически неисчерпаемы, поэтому использование энергии термоядерного синтеза в мирных целях является одной из важнейших задач современной науки и техники.

Управляемую термоядерную реакцию синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода предполагается осуществить, нагревая плазму путем пропускания через нее электрического тока. Для удержания нагретой плазмы от соприкосновения со стенками камеры А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм предложили использовать магнитные поля особой конфигурации. На экспериментальной установке «Токамак-10» российским физикам удалось нагреть плазму до температуры $1,3 \cdot 10^7$ К.

Второй возможный путь — нагревание водорода с помощью лазерного излучения. Для этого световые пучки от нескольких мощных лазеров должны быть сфокусированы на стеклянном шарике, внутри которого заключена смесь тяжелых изотопов дейтерия и трития. В экспериментах на

лазерных установках уже получена плазма с температурой в несколько десятков миллионов К. Но затраты энергии в этом случае больше получаемой в результате реакции.

§ 74. Свойства ионизирующих излучений

Основным источником естественной радиоактивности является радиоактивный инертный газ радон, возникающий в результате альфа-распада радия. Так как радий содержится в небольших количествах практически во всех почвах, повсюду из почвы в атмосферу выделяется радон. Наряду с радоном в атмосфере содержится радиоактивный газ торон (продукт альфа-распада тория), а также продукты их распада.

Естественные радиоактивные изотопы имеются в заметных количествах в почве и стенах зданий, в воздухе и в воде, в пище и тканях человеческого организма, однако содержание их в природе во много раз меньше тех количеств, которые могут представлять опасность для здоровья человека.

Человек с помощью своих органов чувств не способен обнаружить не только слабые и потому безвредные ионизирующие излучения, но даже и те, которые представляют для него смертельную опасность (искусственная радиоактивность). Поэтому важной задачей для практики является изучение свойств ядерных излучений, особенностей их взаимодействия с веществом, выяснение влияния ионизирующих излучений на человеческий организм и разработка приборов, способных регистрировать такого рода излучения, измерять поток ионизирующих излучений и сообщать человеку о грозящей опасности.

При движении через вещество быстрые заряженные частицы взаимодействуют с электронными оболочками и ядрами атомов, встречающихся на пути. В результате взаимодействия с оболочками может произойти возбуждение или ионизация атома. При прохождении вблизи атомного ядра быстрая заряженная частица испытывает торможение в его электрическом поле. Этот процесс сопровождается испусканием квантов рентгеновского излучения. В случае живого организма эти явления приводят к биохимическим изменениям в клетке: образуются новые молекулы, чуждые нормальной клетке. Одно из первых следствий действия облучения на живую клетку — нарушение ее функции деления как самой сложной функции. Поэтому в первую очередь нарушается работа органов, в которых происходит деление клеток (костный мозг, селезенка, лимфатические железы). Любая доза облучения способна вызвать необратимые генетические изменения хромосом и привести к наследственным аномалиям, проявляющимся даже через несколько поколений.

Альфа- и бета-излучения обладают небольшой проникающей способностью. Плотная одежда поглощает значительную часть β -частиц и совсем не пропускает α -частицы. Наиболее проникающие виды ионизирующих излучений — γ -кванты и нейтроны. При внешнем облучении они представляют для человека наибольшую опасность.

Универсальной мерой воздействия любого вида излучения на вещество является *поглощенная доза излучения*, равная отношению энергии, переданной ионизирующим излучением веществу, к массе вещества:

$$D = \frac{E}{m}.$$

За единицу поглощенной дозы в СИ принят *грей (Гр)*:

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

Современные методы медицинского обследования позволяют обнаружить признаки лучевого поражения организма при дозах рентгеновского или гамма-излучения, превышающих 0,25 Гр. Дозы общего облучения человека в 2 Гр приводят к лучевой болезни, дозы в 7—8 Гр и более почти всегда смертельны.

Многолетняя практика работы с источниками ионизирующих излучений в исследовательских лабораториях и использования ядерных излучений и рентгеновских лучей в медицине позволила установить предельно допустимую дозу общего облучения человеческого организма, не причиняющего ему никакого заметного вреда. По современным данным, такой дозой рентгеновского или гамма-излучения является доза в 0,05 Гр в год.

При одном рентгеновском обследовании доза облучения человека в несколько раз меньше допустимой дозы.

§ 75. Элементарные частицы

Открытие явления радиоактивности и результаты опытов Резерфорда убедительно показали, что атомы не являются неделимыми простейшими частицами. Как было установлено, они состоят из электронов, протонов и нейтронов. На первых порах частицы, из которых построены атомы, считались неспособными ни к каким изменениям и превращениям. Поэтому их называли *элементарными частицами*. Дальнейшие исследования этих трех частиц показали условность данного термина. Так, нейтрон в свободном состоянии существует в среднем около 15 минут, а затем самопроизвольно распадается на протон, электрон и нейтрино.

Полное число параметров, определяющих свойства частиц, довольно велико. Важнейшими из них являются масса частицы, ее электрический заряд, спин и время жизни. Рассмотрим элементарные частицы, время жизни которых превышает 10^{-20} с (табл. 2). Частицы с массами, не превышающими 207 электронных масс (кроме одной из них), составляют группу легких частиц — лептонов. Частицы с массами больше 207 электронных масс, но меньше массы протона входят в группу мезонов (средних частиц). Протон и более тяжелые частицы составляют группу барионов. Особое место в таблице занимает фотон, не входящий ни в одну из названных групп.

Таблица 2

Название частиц		Масса в электр. массах	Электрический заряд	Время жизни, с		
Фотон		0	0	Стабилен		
Лептоны	Нейтрино электронное	0	0	Стабильно		
	Нейтрино мюонное	0	0	Стабильно		
	Тау-нейтрино	0	0	Стабильно		
	Электрон	1	-1	Стабилен		
	Мюон	207	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$		
	Тау-лептон	3492	-1	$1,46 \cdot 10^{-12}$		
Мезоны	Пи-мезоны		264,1 (π^0)	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$	
			273,1 (π^+)	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	
	Ка-мезоны		966,4 (K^+)	1	$1,2 \cdot 10^{-11}$ (K^0_s)	
			974,1 (K^0)	0	$5,2 \cdot 10^{-8}$ (K^0_L)	
Эта-нуль мезон		1074	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$		
Барионы	Нуклоны		Протон	1836,1	1	Стабилен
			Нейтрон	1838,6	0	10^3
	Гипероны	Гиперон-лямбда		2183,1	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Гиперон-сигма		2327,6 (Σ^+)	1	$8 \cdot 10^{-11}$
				2333,6 (Σ^0)	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$
				2343,1 (Σ^-)	-1	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Гиперон-кси		2572,8 (Ξ^0)	0	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			2585,6 (Ξ^-)	-1	$1,64 \cdot 10^{-10}$	
Омега-минус-гиперон		3273	-1	$8,2 \cdot 10^{-11}$		

Разделение элементарных частиц на группы определяется не только различием в массах, но и рядом других существенных свойств. Так, лептоны и барионы имеют спин, равный $\frac{1}{2}$, спины мезонов равны нулю, а фотон обладает спином, равным 1.

В 1928 г. английский физик Поль Дирак создал теорию, из которой следовало, что в природе должна существовать частица с массой, равной массе электрона, заряженная положительно. Такая частица — позитрон — была обнаружена экспериментально в 1932 г.

В 1933 г. Фредерик и Ирен Жолио-Кюри обнаружили, что гамма-квант с энергией, большей энергии покоя электрона и позитрона, при прохождении вблизи атомного ядра может превратиться в пару электрон-позитрон. Электрон и позитрон, способные к совместному «рождению» в паре и к аннигиляции при встрече, назвали *античастицами*.

К настоящему времени установлено, что античастица имеется у каждой элементарной частицы. Масса любой античастицы в точности равна массе соответствующей частицы, а электрический заряд равен по абсолютному значению заряду частицы и противоположен ему по

знаку. Частица и античастица у таких незаряженных частиц, как фотон и пи-нуль-мезон, по физическим свойствам совершенно неразличимы и поэтому считаются одной и той же частицей.

Кроме частиц, представленных в таблице, открыто большое число частиц с очень малым временем жизни — около 10^{-22} с. Эти частицы названы *резонансами*. С открытием этих частиц неопределенность понятия «элементарная частица» стала особенно заметной.

В 1963 г. М. Гелл-Маном и Дж. Цвейгом была предложена гипотеза о существовании в природе нескольких частиц, названных *кварками*. Согласно этой гипотезе все мезоны, барионы и резонансы построены из кварков и антикварков, соединенных между собой в различных комбинациях. Каждый барион состоит из трех кварков, антибарион — из трех антикварков. Мезоны состоят из пар кварков с антикварками.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Из каких частиц состоит атомное ядро? Почему в природе нет заметного количества свободных нейтронов? Что такое массовое число? Зарядовое число? Охарактеризуйте изотопы и изобары.

2. Каковы свойства ядерных сил? Как объясняется свойство насыщения ядерных сил? Почему протон и нейтрон часто рассматривают как одну ядерную частицу — нуклон — в двух разных состояниях?

3. Что такое энергия связи ядра? Удельная энергия связи?

4. Используя интернет-ресурсы, познакомьтесь с моделями строения ядра; представьте их схематично.

5. При осмыслении и систематизации материала по теме «Радиоактивность» предложите форму обобщающей таблицы. Заполните эту таблицу.

6. По какому закону происходит радиоактивный распад атомных ядер? Почему до сих пор на Земле не распались все радиоактивные ядра?

7. Дайте определение ядерной реакции. Опишите опыт, в котором впервые были обнаружены ядерные реакции. Чем отличаются ядерные реакции от радиоактивных превращений?

8. При каких условиях могут развиваться цепные реакции? В каком виде выделяется энергия при делении ядер урана? Почему при делении ядер урана освобождается несколько нейтронов? Почему цепная реакция не осуществляется в природном уране?

9. Составьте по теме «Ядерный реактор» вопросы, которые требуют от отвечающего развернутого ответа. Количество вопросов — не менее пяти.

10. Ознакомьтесь с содержанием фильма о перспективах получения управляемой термоядерной реакции «Термоядерный синтез. Солнце на Земле» (<https://www.youtube.com/watch?v=JRQI-wttaXA>). Составьте аннотацию фильма, которая позволяла бы зрителю при предварительном знакомстве с фильмом сделать вывод о его содержании и структуре, понять, окажется ли он полезным для углубления знаний в интересующей области. Напоминаем, что в аннотации содержание первоисточника должно быть передано лаконично и емко, в форме связного текста. Средний объем аннотации — не более 1 страницы.

11. Какими процессами обусловлено биологическое действие ионизирующих излучений на живой организм? Какие дозы излучения опасны для человека? Как можно уменьшить дозу излучения, получаемую человеческим организмом от источника излучения?

12. Как принято классифицировать элементарные частицы по различию в массах, спинах? Что такое античастица? Что Вам известно об открытии и изучении новых элементарных частиц на Большом адронном коллайдере (БАКе)? При ответе на вопрос опирайтесь на материал фильма «Жизнь замечательных идей. Частица Бога» (<http://www.youtube.com/watch?v=7-mOxkMfa4A>). Ответ представьте в виде таблицы.

Основные эксперименты, проведенные на БАКе	Перспективы использования БАКа
1.	1.
2.	2.
...	...

Рекомендуемая литература

1. Бялко, А. В. Наша планета — Земля / А. В. Бялко. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 240 с.
2. Волькенштейн, М. В. Биофизика : учеб. пособие / М. В. Волькенштейн. СПб. : Лань, 2012. 596 с.
3. Грабовский, Р. И. Курс физики : учеб. пособие / Р. И. Грабовский. СПб. : Лань, 2012. 608 с.
4. Жарков, В. Н. Внутреннее строение Земли и планет / В. Н. Жарков. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 416 с.
5. Кабардин, О. Ф. Физика : справ. для старшеклассников и поступающих в вузы / О. Ф. Кабардин. М. : АСТ-Пресс, 2014. 528 с.
6. Кац, Ц. Б. Биофизика на уроках физики. Из опыта работы : пособие для учителей / Ц. Б. Кац. М. : Просвещение, 1974. 128 с.
7. Кейн, Г. Суперсимметрия и не только. От бозона Хиггса к новой физике / Г. Кейн. М. : Лаборатория знаний (ранее «БИНОМ. Лаборатория знаний»), 2015. 235 с.
8. Лаврова, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов биол.-хим. фак. пед. ин-тов / И. В. Лаврова. М. : Просвещение, 1981. 256 с.
9. Мерион, Дж. Общая физика с биологическими примерами / Дж. Мерион ; пер. с англ. под ред. А. Д. Суханова. М. : Высш. шк., 1986. 623 с.
10. Рамсторф, С. Ветер, дождь и облака / С. Рамсторф. М. : Лаборатория знаний (ранее "БИНОМ. Лаборатория знаний"), 2015. 223 с.
11. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика : учеб. для вузов / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Дрофа, 2003. 560 с.
12. Роуэлл, Г. Физика / Г. Роуэл, С. Герберт ; пер. с англ. под ред. В. Г. Разумовского. М.: Просвещение, 1994. 576 с.
13. Сытин, В. Г. Молекулярная физика в жизни, технике и природе : учеб. пособие / В. Г. Сытин. СПб. : Лань, 2015. 624 с.
14. Тарасов, Л. В. Физика в природе : книга для учащихся / Л. В. Тарасов. М. : Просвещение, 1988. 351 с.
15. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. 21-е изд., стер. М. : Изд. центр «Академия», 2015. 560 с.
16. Физика. 10 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики : профил. уровень / О. Ф. Кабардин, В. А. Орлов, Э. Е. Эвенчик [и др.] ; под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. 13-е изд. М. : Просвещение, 2011. 431 с.
17. Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики : профил. уровень / А. Т. Глазунов, О. Ф. Кабардин, А. Н. Малинин [др.] ; под ред. А. А. Пинского, О. Ф. Кабардина. 12-е изд. М. : Просвещение, 2011. 416 с.

Учебное издание

Полянская Елена Евгеньевна
Зайковский Олег Иосифович

Курс физики

Учебное пособие для студентов института естествознания и экономики

2-е издание, исправленное и дополненное

Редакторы В. А. Котунова, И. Н. Рожков
Компьютерная верстка Г. Г. Князевой

Подписано в печать 14.09.2016 г.
Формат 60×84 ¹/₈. Усл. печ. л. 17,3
Тираж 100 экз.
Заказ 51