

# СОДЕРЖАНИЕ

---

Предисловие.....	11
------------------	----

---

<b>1 Введение в электротехнику</b> .....	12
Понятие о веществе .....	13
Понятие об атоме .....	14
Несколько поучительных чисел .....	16
Электрический заряд .....	17
Опыт .....	18
Проводники и изоляторы .....	20
Вопросы для самопроверки .....	21
Задачи .....	25

---

<b>2 Электрический ток</b> .....	26
Понятие об электрическом токе .....	27
Электрическая цепь.....	28
Сила электрического тока.....	31
Единица силы тока .....	32
Измерение силы тока.....	33
Виды электрического тока .....	34
Применение постоянного и переменного тока .....	38
Действия электрического тока .....	39
Вопросы для самопроверки .....	43
Задачи .....	49

---

<b>3 Электрическое сопротивление</b> .....	50
Понятие об электрическом сопротивлении.....	51
Единица электрического сопротивления .....	51
Зависимость сопротивления от размеров проводника.....	52
Расчет сопротивления проводника.....	56
Зависимость сопротивления от температуры.....	58
Электрическая проводимость.....	62
Удельная проводимость .....	62
Вопросы для самопроверки .....	63
Задачи .....	69

---

<b>4 Электрическое напряжение</b> .....	73
Определение электрического напряжения .....	74

Единица электрического напряжения.....	74
Источники постоянного напряжения.....	75
Классификация напряжений.....	78
Измерение электрического напряжения.....	78
Вопросы для самопроверки.....	79
<hr/>	
<b>5 Закон Ома.....</b>	<b>82</b>
Связь между силой тока, напряжением и сопротивлением.....	83
Закон Ома.....	83
Опыт.....	84
Измерение нагрузки при помощи вольтметра и амперметра.....	86
Вопросы для самопроверки.....	86
Задачи.....	89
<hr/>	
<b>6 Электрическая энергия и мощность.....</b>	<b>91</b>
Электрическая мощность.....	93
Измерение мощности при помощи вольтметра и амперметра.....	98
Расчет электроэнергии, израсходованной потребителем.....	99
Стоимость электроэнергии.....	100
Вопросы для самопроверки.....	101
Задачи.....	104
<hr/>	
<b>7 Параллельное соединение сопротивлений.....</b>	<b>109</b>
Что такое параллельное соединение?.....	110
Закон токов Кирхгофа (закон узлов).....	111
Расчет токов в ветвях и суммарной силы тока.....	115
Полное сопротивление цепи, состоящей из потребителей, включенных параллельно.....	116
Два различных резистора, включенных параллельно.....	118
Равные сопротивления, соединенные параллельно.....	119
Суммарная мощность потребителей, соединенных параллельно.....	120
Суммарная энергия потребителей, соединенных параллельно.....	121
Вопросы для самопроверки.....	122
Задачи.....	127
<hr/>	
<b>8 Последовательное соединение сопротивлений.....</b>	<b>139</b>
Последовательное соединение. Что это?.....	140
Сопротивление последовательной цепи.....	141

---

Расчет силы тока в последовательной цепи.....	142
Падение напряжения .....	142
Второй закон Кирхгофа (закон падений напряжения) .....	147
Электродвижущая сила (ЭДС).....	149
Мощность в последовательной цепи.....	153
Применение последовательного соединения.....	153
Вопросы для самопроверки .....	156
Задачи .....	162

---

<b>9</b> <b>Смешанное соединение сопротивлений</b> .....	181
Сущность смешанного соединения.....	182
Расчет общего сопротивления смешанной цепи.....	182
Расчет силы токов, падений напряжения и мощностей в смешанной цепи .....	186
Группы потребителей в сети.....	190
Делители напряжения .....	192
Расширение предела измерения амперметра.....	196
Расширение предела измерения вольтметра .....	199
Мост Уитстона.....	201
Вопросы для самопроверки.....	203
Задачи .....	216

---

<b>10</b> <b>Соединение источников напряжения</b> .....	251
Сопротивление отдельного аккумулятора в электрической цепи .....	252
Емкость аккумулятора.....	253
Последовательное соединение аккумуляторов – последовательные батареи.....	254
ЭДС последовательной батареи аккумуляторов .....	255
Внутреннее сопротивление последовательной батареи аккумуляторов .....	256
Емкость последовательной батареи .....	257
Параллельное соединение аккумуляторов – параллельные батареи .....	258
ЭДС параллельной батареи.....	259
Внутреннее сопротивление параллельной батареи .....	259
Емкость параллельной батареи.....	260
Смешанное соединение аккумуляторов – смешанные батареи .....	261
Соединение аккумуляторов для получения максимального тока .....	263

---

Цепи с несколькими источниками напряжения .....	264
Вопросы для самопроверки .....	273
Задачи .....	280

---

<b>11</b> Преобразование энергии .....	299
Механическая работа, энергия и мощность.....	300
Преобразование электрической энергии в механическую энергию.....	303
Потери, коэффициент полезного действия .....	304
Тепловая энергия.....	307
Преобразование электрической энергии в тепловую.....	309
Короткое замыкание .....	315
Вопросы для самопроверки.....	318
Задачи .....	323

---

<b>12</b> Магнетизм .....	329
Магнитное притяжение .....	330
Ферромагнитные вещества.....	330
Магнитные полюса .....	330
Естественные и искусственные магниты .....	331
Взаимодействие между магнитными полюсами .....	333
Магнитное поле .....	334
Дополнительные свойства магнитов.....	336
Вопросы для самопроверки.....	341

---

<b>13</b> Магнитное поле, электромагнит.....	344
Магнитное поле проводника с током.....	345
Магнитное поле катушки с током .....	348
Магнитодвижущая сила и напряженность магнитного поля.....	350
Электромагнит .....	352
Вопросы для самопроверки.....	356
Задачи .....	362

---

<b>14</b> Магнитные цепи.....	363
Магнитный поток и плотность магнитного потока .....	364
Магнитная проницаемость .....	365
Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов .....	368
Петля намагничивания .....	371

Гистерезис .....	374
Магнитная цепь .....	375
Зависимость магнитного сопротивления от материала сердечника и его размеров .....	376
Формула Гопкинсона для магнитной цепи .....	379
Последовательная магнитная цепь .....	380
Закон Кирхгофа для последовательной магнитной цепи .....	382
Параллельная магнитная цепь .....	382
Вопросы для самопроверки .....	383
Задачи .....	389

---

<b>15</b>	<b>Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле .....</b>	<b>397</b>
	Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле .....	398
	Определение величины силы .....	399
	Момент, действующий на виток с током в магнитном поле ...	401
	Принцип действия амперметра с подвижной катушкой .....	405
	Принцип действия двигателя постоянного тока .....	408
	Сила, действующая между двумя параллельными проводниками с током .....	411
	Подъемная сила электромагнита .....	414
	Вопросы для самопроверки .....	415
	Задачи .....	422

---

<b>16</b>	<b>Электромагнитная индукция .....</b>	<b>425</b>
	Создание индуктированной ЭДС .....	426
	Направление индуктированной ЭДС .....	426
	Закон Ленца .....	428
	Величина индуктированной ЭДС в проводе, движущемся в магнитном поле .....	428
	Виток, вращающийся в магнитном поле .....	429
	Принцип действия генератора .....	431
	ЭДС, индуктированная в проводнике вследствие изменения магнитного потока .....	435
	Самоиндукция .....	438
	Дроссель .....	439
	Коэффициент самоиндукции (индуктивность) .....	440
	Определение потока в катушке .....	441
	Индуктивность дросселей, соединенных последовательно .....	442

Взаимоиндукция .....	442
Коэффициент взаимоиנדукции (взаимоиндуктивность) .....	442
Трансформатор.....	444
Искровой индуктор.....	448
Вихревые токи.....	449
Вопросы для самопроверки.....	451
Задачи .....	459

---

<b>17</b> Электростатика.....	466
Методы зарядки неподвижными зарядами .....	467
Зарядка металлического тела .....	470
Электростатическое поле.....	473
Электрический поток и его плотность .....	476
Диэлектрическая проницаемость.....	478
Диэлектрическая прочность.....	480
Вопросы для самопроверки .....	481
Задачи .....	487

---

<b>18</b> Конденсаторы .....	490
Емкость.....	491
Поведение конденсатора цепи постоянного тока .....	493
Соединение конденсаторов .....	501
Виды применяемых конденсаторов.....	506
Вопросы для самопроверки .....	511
Задачи .....	524

---

<b>19</b> Сущность переменного тока.....	541
Характеристика ЭДС, индуцируемой в витке, который вращается в однородном магнитном поле.....	542
Значения переменного напряжения и тока .....	548
Фаза .....	554
Построение векторных диаграмм.....	555
Основные действия переменного тока .....	558
Преимущества и недостатки переменного тока .....	559
Вопросы для самопроверки .....	559
Задачи .....	566

---

<b>20</b> Резистор, соленоид и конденсатор в цепи переменного тока .....	574
Резистор в цепи переменного тока.....	575

---

Соленоид в цепи переменного тока .....	577
Конденсатор в цепи переменного тока .....	585
Вопросы для самопроверки .....	589
Задачи .....	599

---

<b>21</b> <b>Последовательные цепи переменного тока</b> .....	606
Последовательные цепи, состоящие из резистора и соленоида ( <i>RL</i> ) .....	607
Последовательная цепь, состоящая из резистора и конденсатора ( <i>RC</i> ) .....	627
Последовательная цепь, содержащая соленоид и конденсатор ( <i>LC</i> ) .....	637
Сила тока в последовательной цепи ( <i>LC</i> ) .....	641
Последовательная цепь, содержащая резистор, соленоид и конденсатор ( <i>RLC</i> ) .....	644
Вопросы для самопроверки .....	655
Задачи .....	673

---

<b>22</b> <b>Параллельные цепи переменного тока</b> .....	696
Цепь, содержащая резистор и соленоид ( <i>RL</i> ) .....	697
Параллельные цепи, содержащие резистор и конденсатор ( <i>RC</i> ) .....	703
Параллельная цепь, состоящая из соленоида и конденсатора ( <i>LC</i> ) .....	708
Параллельная цепь, состоящая из резистора, соленоида и конденсатора ( <i>RLC</i> ) .....	714
Вопросы для проверки .....	722
Задачи .....	734

---

<b>23</b> <b>Смешанные цепи переменного тока</b> .....	743
Полные сопротивления .....	744
Улучшение коэффициента мощности .....	747
Вопросы для самопроверки .....	755
Задачи .....	756

---

<b>24</b> <b>Трехфазная система токов</b> .....	770
Генератор трехфазного тока .....	771
Трехфазная сеть, питающаяся от генератора с соединением в звезду .....	774

Трехфазная сеть, питающаяся от генератора с соединением в треугольник.....	782
Включение потребителей в трехфазную трехпроводную сеть .....	784
Несимметричная трехфазная сеть .....	787
Подключение трехфазных потребителей .....	789
Вопросы для самопроверки .....	790
Задачи .....	795

---

<b>25</b> Основные сведения по электрохимии .....	811
Основные понятия.....	812
Электрохимические явления.....	815
Законы Фарадея .....	816
Первый закон Фарадея .....	817
Применения электролиза.....	819
Химические источники напряжения .....	821
Первичные элементы.....	823
Вторичные гальванические элементы (аккумуляторы) .....	828
Устройство свинцового аккумулятора .....	831
Вопросы для самопроверки .....	838
Задачи .....	849

---

<b>26</b> Рациональные методы расчета сложных цепей .....	851
Метод контурных токов.....	853
Метод наложения (суперпозиции).....	854
Метод эквивалентного генератора.....	856
Упрощение цепей путем преобразования соединения в звезду в соединение в треугольник и соединения в треугольник в соединение в звезду .....	860
Задачи .....	863

<b>Ответы на вопросы</b> .....	870
<b>Ответы на задачи</b> .....	875

# Предисловие

К созданию этой книги привело отсутствие учебника, соответствующего программе для профессионально-технических училищ. В книге уделено особое внимание методике изложения теории электротехники, и это новшество, как нам кажется, – в оценке различных подходов.

Книга состоит из двух частей, содержащих 550 рисунков и чертежей, 200 задач с решениями, 700 задач и 450 вопросов для самопроверки усвоения.

Первая часть посвящена постоянному току и электромагнетизму.

Материал преподносится в легкой и доступной форме, и все объяснения систематизированы. Чтобы предоставить возможность для самостоятельного изучения, в конце книги приведены ответы на все вопросы и задачи.

Материал соответствует программе для профессионально-технических училищ.

Я буду рад всем замечаниям по содержанию и методике.

Автор

# 1 Введение в электротехнику

<b>2</b>	Электрический ток	26
<b>3</b>	Электрическое сопротивление	50
<b>4</b>	Электрическое напряжение	73
<b>5</b>	Закон Ома	82
<b>6</b>	Электрическая энергия и мощность	91
<b>7</b>	Параллельное соединение сопротивлений	109
<b>8</b>	Последовательное соединение сопротивлений	139
<b>9</b>	Смешанное соединение сопротивлений	181
<b>10</b>	Соединение источников напряжения	251
<b>11</b>	Преобразование энергии	299
<b>12</b>	Магнетизм	329
<b>13</b>	Электромагнитное поле. Электромагнит	344
<b>14</b>	Магнитные цепи	363
<b>15</b>	Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле	397
<b>16</b>	Электромагнитная индукция	425
<b>17</b>	Электростатика	466
<b>18</b>	Конденсаторы	490
<b>19</b>	Сущность переменного тока	541
<b>20</b>	Резистор, соленоид и конденсатор в цепи переменного тока	574
<b>21</b>	Последовательные цепи переменного тока	606
<b>22</b>	Параллельные цепи переменного тока	696
<b>23</b>	Смешанные цепи переменного тока	743
<b>24</b>	Трёхфазная система токов	770
<b>25</b>	Основные сведения по электрохимии	811
<b>26</b>	Рациональные методы расчета сложных цепей	851

## Понятие о веществе

Каждый объект, занимающий место в пространстве и имеющий размеры и вес, называется **веществом**. Вещества могут находиться в одном из трех **агрегатных состояний**: твердом, жидком и газообразном.

Твердое вещество сохраняет свой объем и свою форму. Жидкость сохраняет объем, но не сохраняет форму, а принимает форму сосуда, в котором она находится.

В отличие от твердого вещества и жидкости, газ не сохраняет ни форму, ни объем, а распространяется по всем направлениям. Приведем пример. Вода в обычных условиях может находиться в одном из трех состояний: лед – твердое тело, вода – жидкость, пар – газ (рис. 1.1). Добавляя тепло (нагрев) или отнимая его (охлаждение), можно изменить ее агрегатное состояние, то есть при нагреве превратить ее в пар, а путем охлаждения – в лед.

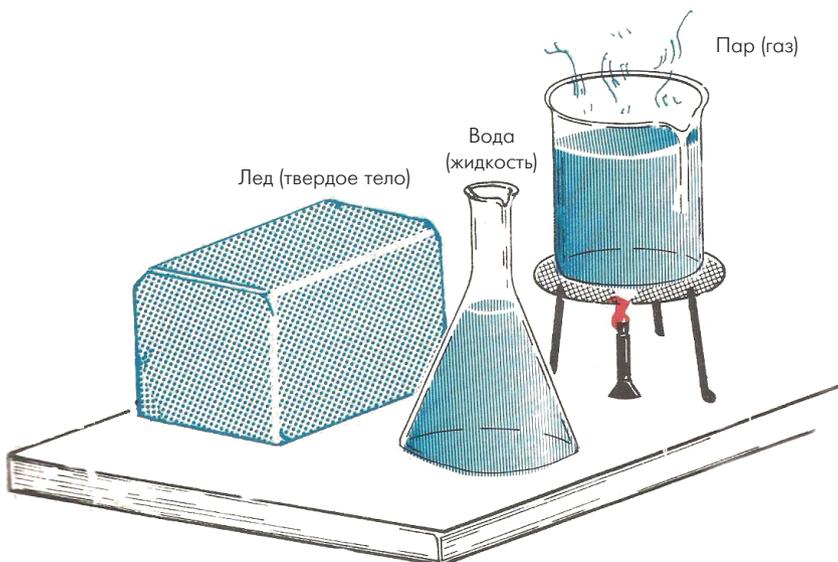


Рис. 1.1

Если какое-то вещество измельчить до предела возможных физических границ, мы получим молекулы. **Молекула** – это наименьшая частица вещества, сохраняющая все его свойства. Молекулы

настолько малы, что если каждую секунду бросать в стакан одну молекулу, то для заполнения стакана потребуются миллионы лет.

Молекула состоит из еще более мелких частиц – атомов. **Атомы** настолько малы, что если выстроить их в один ряд вплотную, то в одном миллиметре уместится 10 миллионов атомов.

Вещество, состоящее из атомов только одного вида, называется **химическим элементом**. К настоящему времени известны 104 химических элемента, причем каждый из них состоит из атомов другого вида. Химические элементы являются самыми простыми веществами, и их число ограничено. Однако из них можно составить бесчисленное множество веществ, подобно бесчисленному множеству слов, которые можно составить из букв алфавита. Вещества, состоящие из различных химических элементов, называются **химическими соединениями**.

Из 104 химических элементов 90 существуют в природе, остальные созданы искусственно. 83 химических элемента – это металлы, находящиеся в обычных условиях, кроме ртути, в твердом состоянии. 11 элементов являются газами, и 2 – жидкостями.

Вещества: водород, кислород, серебро, золото, медь, железо, алюминий – являются элементами.

Итак, химические элементы состоят из однородных атомов, а химические соединения – из различных атомов.

Агрегатное состояние вещества зависит от плотности молекул. Так, плотность молекул воды выше плотности молекул пара и ниже плотности молекул льда. Изменить агрегатное состояние вещества можно путем изменения его температуры либо давления.

## Понятие об атоме

Как нам уже известно, наименьшая частица вещества, сохраняющая все его свойства, – это атом. Атом состоит из частиц, еще более мелких: электронов, протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны, составляющие ядро атома, неподвижны. Электроны движутся вокруг ядра по орбитам, расположенным на различных расстояниях от ядра (рис. 1.2).

Рассматривая этот рисунок, мы видим, что наибольшая часть пространства, которое занимает атом, – это пустота. Электроны, движущиеся вокруг ядра, напоминают планеты, движущиеся вокруг солнца. Большая часть веса атома сосредоточена в ядре, а вес

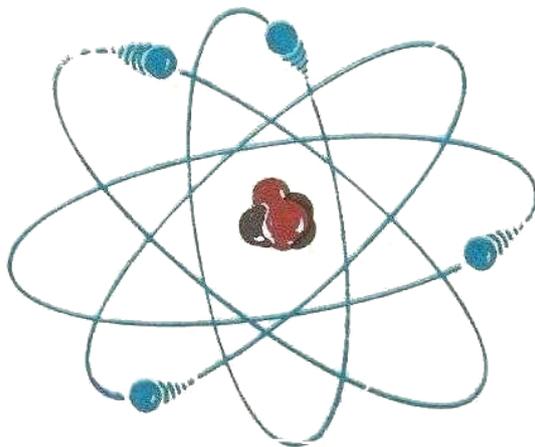


Рис. 1.2

электронов ничтожно мал, по сравнению с весом ядра, то есть вес атома приблизительно равен весу ядра.

Простейшим атомом является атом водорода, состоящий из одного протона и одного электрона. Атом водорода не содержит нейтронов (рис. 1.3).

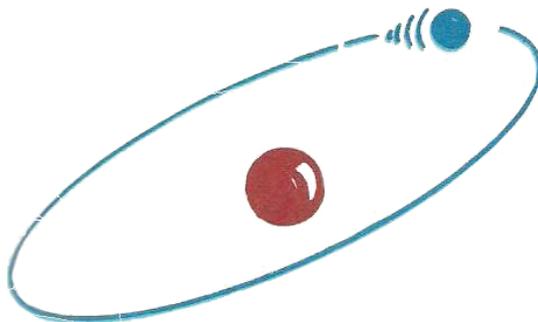


Рис. 1.3

Электроны и протоны обладают особым свойством – электрическим зарядом. Заряд протона положителен (+), заряд электрона отрицателен (-) (рис. 1.4).

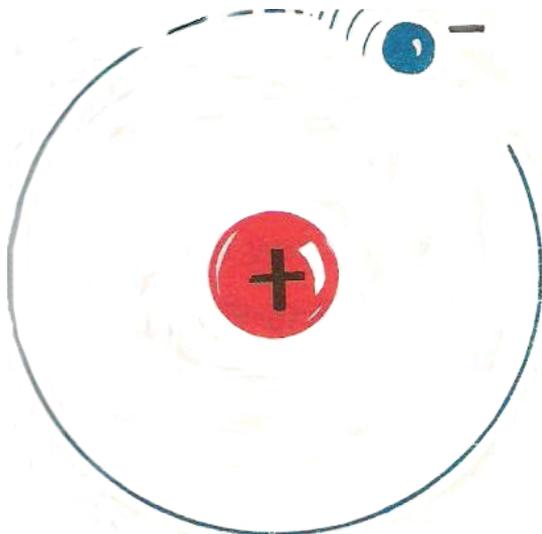


Рис. 1.4

Протоны не обладают этим свойством, поэтому можно сказать, что у протонов отсутствует электрический заряд, и по данной причине они не являются темой обсуждения в этой книге.

## Несколько поучительных чисел

Понятие об атоме связано с числами, как очень большими, так и очень малыми. Для их записи удобно пользоваться сокращенным способом, который позволяет избавиться от большого количества нулей.

Сокращенная запись больших чисел выглядит так:

$$10 \times 1 = 10^1 = 10; \quad 100 = 10 \times 10 = 10^2; \quad 1000 = 10 \times 10 \times 10 = 10^3; \\ 10\,000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10^4 \text{ и т. д.}$$

Подобным образом малые числа записываются так:

$$1/10 = 1/10 \times 1 = 10^{-1}; \quad 1/100 = 1/100 \times 2 = 10^{-2}; \\ 1/1000 = 1/10 \times 3 = 10^{-3}; \quad 1/10000 = 10^{-4} \text{ и т. д.}$$

После того как мы познакомились с сокращенной записью чисел, мы можем привести несколько чисел для понимания атома.

Диаметр электрона:  $4 \times 10^{-13}$  см. Вес электрона:  $0,9 \times 10^{-27}$  г.  
Диаметр атома водорода:  $1,1 \times 10^{-8}$  см. Вес протона –  $1,7 \times 10^{-24}$  г.

## Электрический заряд

Как нам уже известно, электрон обладает отрицательным зарядом, а протон – положительным. В обычных условиях число электронов в атоме равно числу протонов. Суммарный заряд электронов равен суммарному заряду протонов, но противоположен по знаку, и поэтому атом в целом не имеет заряда.

Допустим, что нам удалось в каком-либо теле сконцентрировать большое количество электронов. Тогда это тело приобретет отрицательный заряд. Такой заряд может быть создан путем натирания эбонитовой палочки клочком шерсти. При этом электроны перейдут из шерсти на палочку и зарядят ее отрицательно (рис. 1.5). Ясно, что сама шерсть, потерявшая электроны, будет заряжена положительно.

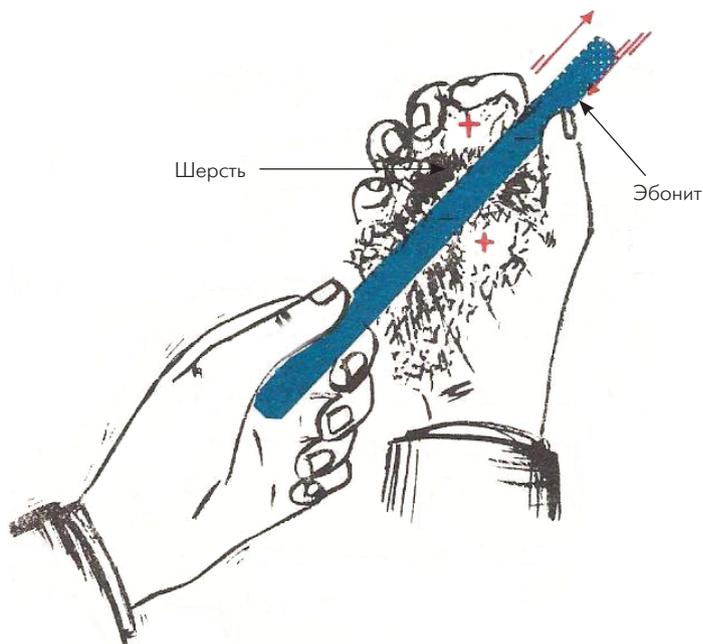


Рис. 1.5

Подобным образом, натирая стеклянную палочку полоской шелковой ткани, мы зарядим ее положительно, так как электроны перейдут из палочки на шелк. Шелк же получит отрицательный заряд.

## Опыт

Приготовим для опыта: стеклянную палочку, эбонитовую палочку, клочок шерсти, полоску шелковой ткани и несколько шариков из бузины, подвешенных на штативах.

Натрем стеклянную палочку полоской шелка. Палочка получит положительный заряд. Прикоснемся ею к одному из шариков. В момент касания на шарик перейдут электроны из палочки, и он зарядится положительно (рис. 1.6). Подобным образом зарядим второй шарик.



Рис. 1.6

Теперь зарядим еще два шарика отрицательно путем прикосновения эбонитовой палочки после ее натирания шерстью (рис. 1.7).

Сблизим два положительно заряженных шарика. Они оттолкнутся друг от друга. То же произойдет и с двумя отрицательно заряженными шариками (рис. 1.8).

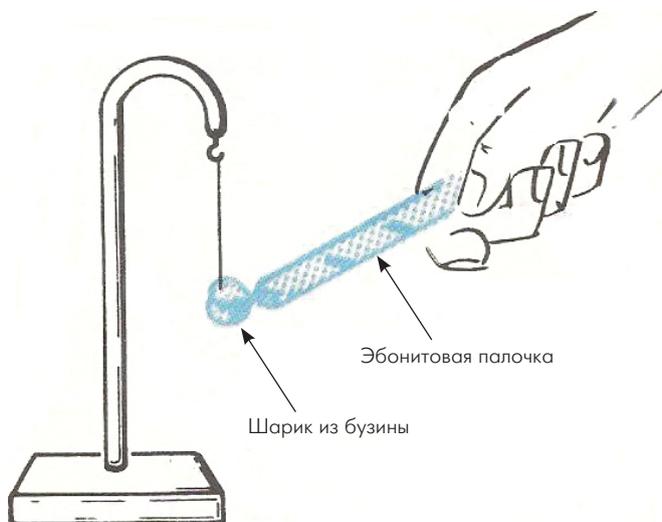


Рис. 1.7



Рис. 1.8

Сблизим два шарика, заряженных разноименно. Они притянутся друг к другу.

#### Выводы:

1. Между разноименными зарядами существует сила притяжения.
2. Между одноименными зарядами существует сила отталкивания.

Заряды, с которыми мы знакомимся до сих пор, – это неподвижные заряды, привязанные к своему месту. Мы называем их **покоящимися зарядами**.

В следующих главах мы увидим, что электрические заряды можно перемещать даже на большие расстояния. Поэтому мы называем их **движущимися зарядами**.

Заряд обозначается  $[q]$ . Чтобы можно было сравнивать заряды между собой, установлена единица заряда кулон [Кл]. Заряд в 1 кулон равен сосредоточению  $6,28 \times 10^{18}$  электронов. Отсюда следует, что заряд одного электрона  $q = 1/6,28 \times 10^{18} = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл.

## Проводники и изоляторы

До сих пор мы знали, что наиболее простой атом – это атом водорода (рис. 1.3). В более сложных атомах электроны распределены по оболочкам. Электроны, принадлежащие к одной оболочке, удалены на равные расстояния от ядра. Отрицательно заряженные электроны притянуты к положительно заряженному ядру и удерживаются на постоянной орбите, из которой они не могут выйти. Эти электроны именуется **орбитальными электронами**. Электроны, находящиеся на внешней оболочке, имеют неустойчивую связь с ядром и могут передвигаться от атома к атому. Эти электроны именуется **свободными электронами** (рис. 1.6).

Число свободных элементов в каждом химическом элементе различно, и они определяют его свойства. В этой книге мы займемся только свободными электронами, так как электричество связано именно с ними.

Как мы уже знаем, число электронов в каждом атоме равно числу протонов. По этой причине атом не имеет электрического заряда в целом, то есть нейтрален.

Предположим на время, что один свободный электрон покинул свой атом. Теперь этот атом стал несбалансированным, заряженным положительно. Он притянет электрон ближайшего к нему атома, а последний притянет электрон следующего атома. Теперь внутри вещества возникнет движение свободных электронов, но это случайное, неупорядоченное движение.

Вещество, обогащенное свободными электронами, называется проводящим веществом, или **проводником**, так как оно дает возможность легкого перемещения электрических зарядов.

Вещество, в котором свободные электроны отсутствуют либо находятся в малом количестве, не дает такой возможности. Это вещество называется **изолятором**.

Металлы являются проводниками. Самый лучший проводник – серебро, за ним следуют медь, алюминий и золото. Можно сказать, что серебро наиболее обогащено свободными электронами, что дает ему возможность легко перемещать электрические заряды.

Хорошими изоляторами являются резина, слюда, фарфор и дистиллированная вода.

В одном кубическом сантиметре серебра содержится  $1,03 \times 10^{23}$  свободных электронов, в меди –  $10^{23}$ , в алюминии –  $6,1 \times 10^{22}$ . В противоположность этому в одном кубическом сантиметре эбонита содержится только два свободных электрона.

## Вопросы для самопроверки

Перед вами ряд вопросов. На каждый вопрос даны четыре ответа, но только один из них является правильным. Выберите правильный ответ и отметьте его на листке бумаги, чтобы установить, насколько вы усвоили пройденный материал.

1.1. Вещество – это:

- А. Любой объект, который можно увидеть и ощутить.
- Б. Любой объект, занимающий место в пространстве, обладающий размером и весом.
- В. Любой объект, существующий в мире.
- Г. Любой объект, изготовленный из железа, дерева или пластика.

1.2. Твердое вещество – это:

- А. Вещество, которое невозможно раздробить.
- Б. Вещество, проводящее электрические заряды.
- В. Не жидкость.
- Г. Вещество, сохраняющее свои объем и форму.

1.3. При изменении агрегатного состояния вещества путем нагрева:

- А. Жидкость превращается в твердое вещество, а газ – в жидкость.
- Б. Жидкость превращается в газ, а твердое вещество – в жидкость.
- В. Газ превращается в жидкость, а твердое вещество – в газ.
- Г. Газ превращается в твердое вещество, а жидкость – в газ.

1.4. Вещество, состоящее из атомов одного вида, – это:

- А. Однородное вещество.
- Б. Химический элемент.
- В. Химическое соединение.
- Г. Твердое вещество.