

И.А. Соловейчик

ФИЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

*Пособие для абитуриентов
и старшеклассников*

ОРАКУЛ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006

ББК 22.3:я 72

С 60

Соловейчик И.А.

С 60 Физика. Молекулярная физика. Электродинамика: Пособие для абитуриентов и старшеклассников – СПб.: «ОРАКУЛ», 2006. — 272 с.

ISBN 5-901032-03-9

Учебное пособие представляет собой законченный курс по основам классической физики в объеме программы общеобразовательной школы. Стиль пособия отличает предельная ясность изложения материала, сочетающаяся с логической стройностью и полнотой, что позволяет рекомендовать пособие весьма широкому кругу читателей с различным уровнем подготовки по физике и математике.

Пособие издается в трех книгах. Вторая из них посвящена изложению молекулярной физики и первой части электродинамики в объеме программы десятого класса средней школы.

Предназначена для преподавателей и учащихся старших классов общеобразовательных и физико-математических школ.

ББК 22.3:я 72

ISBN 5-901032-03-9

© Соловейчик И.А., 1995

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА I

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 1. Введение

1. Еще в Древней Греции свыше двух тысяч лет тому назад была высказана догадка о том, что все вещества состоят из невидимых простым глазом мелких частиц, между которыми могут быть пустые промежутки. Эти частицы теперь называют молекулами. С помощью представления о молекулах можно очень наглядно представить такие явления, как растяжение и сжатие тел, растворение, парообразование и т. д. Например, растяжение тел сводится к увеличению расстояния между молекулами, сжатие — к уменьшению этого расстояния. Растворение сахара в воде можно объяснить тем, что молекулы сахара располагаются в промежутках между молекулами воды. Превращение жидкости в пар означает, что во много раз увеличилось расстояние между молекулами жидкости.

2. В XIX столетии с помощью представления о молекулах и об их составных частях — атомах удалось объяснить огромный круг явлений в физике и химии, но доказательства их существования были только косвенными. Молекулы настолько малы, что ни в один оптический микроскоп увидеть их невозможно. Мельчайшая частица, которую удастся разглядеть в такой микроскоп, содержит миллиарды молекул. Поэтому казалось, что

никогда нельзя будет точно определить их размеры и массу (делались только грубые оценки). Но в XX веке были разработаны разнообразные методы определения величин, характеризующих отдельную молекулу (ее размеры, массу, скорость). Эти методы сравнительно сложны и часто основываются на результатах длинной цепочки рассуждений и сложных математических расчетов. Правда, с помощью современных электронных приборов удалось получить фотографии, где видны отдельные атомы и молекулы, но, чтобы доказать, что мы видим атомы и молекулы, а не случайный узор, созданный этим прибором, необходимы глубокие знания о поведении частей, из которых состоят молекулы (электронов и ионов). Поэтому, хотя физика — наука опытная, т. е. все ее утверждения основываются на наблюдениях и опытах, иногда проверка самого простого утверждения возможна только после длинных рассуждений и сложных расчетов. Поскольку наша цель — кратчайшим путем овладеть современными представлениями в этой области (и начать ими пользоваться для решения задач и объяснения разных явлений), мы не будем разбирать те способы, которые позволили сосчитать число молекул в данной массе вещества и тем самым узнать массу молекул, и способы точного определения размеров молекул.

§ 2. Основные положения молекулярно-кинетической теории

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три положения:

1. Все тела состоят из мелких частиц — молекул, между которыми могут быть пустые промежутки¹.

¹ Во многих кристаллах роль «основных частиц», из которых состоит тело, играют не молекулы, а атомы. Чтобы не усложнять изложение многочисленными оговорками, мы в данном разделе эти частицы также будем называть молекулами.

2. Молекулы безостановочно хаотически движутся; чем выше температура, тем интенсивней это движение.

3. Между молекулами действуют силы притяжения и отталкивания. Когда молекулы сближаются настолько, что начинают заметно деформировать друг друга, возникают силы отталкивания, при удалении их друг от друга возникают силы притяжения.

§ 3. Диффузия и броуновское движение

1. На основе молекулярно-кинетической теории удалось объяснить качественно и количественно огромное число фактов в физике и химии. Почти все достижения современной физики (включая электронику) и химии следует считать подтверждениями этой теории. Среди наиболее наглядных и легко наблюдаемых явлений, иллюстрирующих справедливость этой теории, можно выделить диффузию и броуновское движение.

2. *Диффузией называется самопроизвольное перемешивание вещества.* Например, если в одном углу комнаты пролить духи, то через несколько минут их запах распространится по всей комнате. Молекулярная теория легко объясняет это явление. Духи испаряются, и молекулы этих паров, беспорядочно двигаясь по всем направлениям и непрерывно сталкиваясь с молекулами воздуха и друг с другом, равномерно распределяются по всему объему комнаты. Молекулярная теория не только просто и наглядно объяснила это явление, но и дала возможность рассчитать скорость диффузии.

Диффузия происходит не только в газах, но и в жидкостях, и даже в твердых телах. Если в стакан с чайной заваркой налить воды, то через некоторое время окраска воды всюду станет равномерной. В твердых телах диффузия малозаметна и протекает крайне медленно. Если прижать друг к другу хорошо отшлифованные плитки из разных металлов, то через несколько месяцев можно заметить под микроскопом, что пограничный слой превратился

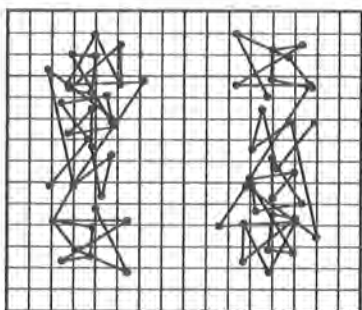


Рис. 1

в сплав этих металлов. При повышении температуры скорость диффузии (газов, жидкостей и твердых тел) возрастает.

3. Если в жидкость поместить мелкие, видимые только в хороший микроскоп крупинки, то они будут беспорядочно и безостановочно двигаться по всем направлениям (рис. 1). Это явление на-

звали броуновским движением по фамилии английского ботаника Броуна, открывшего его в 1827 г. Броуновское движение мельчайших частиц пыли или дыма можно наблюдать и в газе. На рис. 1 отмечены положения частиц через равные промежутки времени (через 30 с). Интенсивность броуновского движения зависит от размеров крупинок и от температуры: с уменьшением размеров крупинок и с увеличением температуры интенсивность броуновского движения возрастает.

Объяснить это явление сумела только молекулярно-кинетическая теория. Каждая крупинка подвергается ударам невидимых в микроскоп молекул. Для больших частиц действие противоположно направленных ударов уравнивается (подобно тому, как «уравнивается» число пассажиров, ежедневно приезжающих и уезжающих из большого города). Малые частицы подвержены немногим ударам, и тут случайный перевес молекул с одной из сторон более вероятен (подобно тому, как на малолюдном полустанке может случиться, что число прибывших за данные сутки пассажиров окажется в несколько раз больше, чем число уехавших).

Математическая теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном в 1905 г. Выводы этой теории настолько хорошо подтвердились на опыте, что последние скептики (из крупных ученых), не признававшие

молекулярно-кинетическую теорию, вынуждены были признать ее справедливость.

Упр. 1. Совпадают ли ломаные линии, изображенные на рис. 1, с траекториями данных частиц?

Упр. 2. Почему крупные частицы не совершают броуновского движения?

§ 3а. Силы взаимодействия между молекулами

1. Если мы признали, что все тела состоят из молекул, то на основе повседневного опыта должны признать, что между ними действуют силы притяжения и отталкивания. В самом деле, если мы хотим растянуть какое-нибудь твердое тело, например линейку, то для этого надо приложить определенную силу. Значит, при увеличении расстояния между молекулами (сверх некоторого равновесного расстояния) между ними возникают силы притяжения. Чем больше растягиваем линейку, тем больше возникающая сила. Однако, если линейка сломается и расстояние между молекулами сделается слишком большим, силы притяжения между молекулами исчезают. Если линейку не растягивать, а наоборот, сжимать, то для этого опять-таки надо приложить усилие. Значит, при сближении молекул между ними возникают силы отталкивания. Чем больше сближаем молекулы, тем больше возникающие при этом силы отталкивания. Таким образом, силы, возникающие между молекулами, слегка напоминают силы, возникающие между двумя шариками, связанными друг с другом пружинкой (рис. 2). При попытке сблизить шарики пружина расталкивает их, а при попытке удалить друг от друга пружина стягивает их.

2. Изобразим зависимость силы, действующей между двумя молекулами, от расстояния между ними.

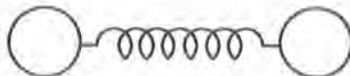


Рис. 2

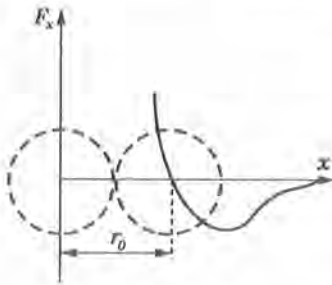


Рис. 3

Примем за тело отсчета одну из молекул (левую на рис. 3) и поместим в ее центре начало координат. Горизонтальную ось направим вправо, а вертикальную — вверх. На вертикальной оси будем откладывать силу, действующую на правую молекулу, или, точнее, проекцию этой силы на ось x . При некотором расстоянии r_0 эта сила равна нулю (положение равновесия). Если теперь правую молекулу удалить от первой, то на нее (на правую молекулу) начнет действовать сила притяжения. Ее проекция на ось x отрицательна, поэтому на графике соответствующая ордината будет отрицательной. При дальнейшем увеличении расстояния эта сила сначала растет по абсолютной величине, а затем уменьшается и сходит на нет. При сближении молекул (начиная от положения равновесия) на правую молекулу будет действовать сила отталкивания, направленная вправо; ее проекция на ось x положительна, поэтому влево от положения равновесия ординаты на графике положительны.

Силы взаимодействия между молекулами являются короткодействующими. Когда расстояние между центрами молекул в несколько раз превышает их диаметр (мы условно будем считать молекулы шариками), то силы притяжения убывают в тысячи раз (по сравнению с максимальным значением). На таких расстояниях этими силами можно пренебрегать.

3. Каково происхождение молекулярных сил? Эти силы не гравитационные¹: они в миллиарды раз сильнее их. Эти силы имеют электрическую природу. Известно, что разноименные заряды притягиваются, а одноименные отталкиваются. Хотя обычно молекулы нейтральны, в них

¹ Напоминаем, что гравитационными называют силы, подчиняющиеся закону всемирного тяготения $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$.

есть электрические заряды, так как каждый атом состоит из положительно заряженного ядра и электронной оболочки, несущей отрицательный заряд.

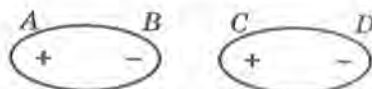


Рис. 4

Если бы положительные и отрицательные заряды каждой молекулы находились в одной точке, то результирующая сила, действующая на молекулу, равнялась бы нулю. Но можно показать, что под действием зарядов соседних молекул заряды в каждой данной молекуле смещаются друг относительно друга так, что между молекулами возникает притяжение.

На близких расстояниях, когда электронные оболочки молекул начинают перекрываться, между молекулами возникают силы отталкивания. Эти силы также имеют электрическую природу, но их происхождение нельзя объяснить так же наглядно, как происхождение сил притяжения.

Упр. 1. Почему осколки разбитой тарелки не слипаются, если их приставить друг к другу?

О т в е т: Поверхности изломов деформируются, поэтому при соприкосновении осколков возникшие шероховатости мешают основной массе молекул сблизиться на расстояние, сравнимое с размерами молекул (только на таком расстоянии вступают в действие силы притяжения).

Упр. 2. Пусть в двух нейтральных молекулах заряды расположены так, как показано на рис. 4. Будут ли эти молекулы взаимодействовать?

О т в е т: Молекула *AB* действует на заряды, расположенные справа от нее, как слабый отрицательный заряд (поскольку отрицательный заряд *B* расположен к этой области ближе, чем положительный заряд *A*). Молекула *CD* действует на расположенную слева от нее область как слабый положительный заряд. Значит, молекулы будут притягиваться друг к другу.

§ 4. Строение газов, твердых тел и жидкостей

1. В газах среднее расстояние между молекулами значительно (раз в 10 при нормальных условиях) больше размера молекул. При таких расстояниях силами молекулярного взаимодействия можно пренебречь, кроме моментов, когда молекулы сталкиваются. В промежутках между столкновениями движение молекул можно считать прямолинейным и равномерным.

Давление газа на стенки создается ударами молекул. При уменьшении объема газа удары эти учащаются, и давление возрастает. В отличие от твердых и жидких тел, газы легко поддаются сжатию, так как молекулы в газах расположены на большом расстоянии друг от друга. При сжатии газа промежутки между молекулами уменьшаются. Если, наоборот, предоставить газу больший объем, то беспорядочно движущиеся молекулы заполнят его, и промежутки между молекулами увеличатся.

2. В твердых телах атомы расположены близко друг к другу. При таком тесном сближении энергии теплового движения недостаточно для того, чтобы атомы могли выйти из сферы притяжения своих соседей, поэтому в твердых телах атомы могут только колебаться около своих положений равновесия. В этом проявляется их тепловое движение. Если соединить центры атомов в положении равновесия отрезками прямых линий, то получится правильная пространственная решетка, называемая кристаллической. Для каждого вещества характерен свой определенный тип решетки (мы рассматриваем только кристаллические твердые тела). На рис. 5 слева изображена кристаллическая решетка поваренной соли, а справа — графита.

3. Жидкости по своему строению занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Молекулы в жидкостях расположены вплотную друг к другу (как муравьи, целиком заполнившие спичечную коробку). Если в газах «образ жизни» молекул можно назвать «кочевым», а в твердых телах — «оседлым», то в жидкостях они ведут «оседло-кочевой» образ жизни. Это значит,

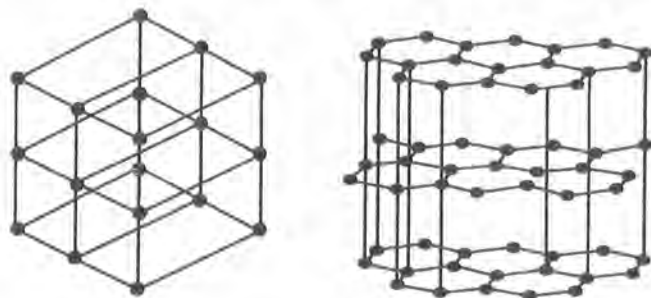


Рис. 5

что, совершив ряд колебаний возле одной какой-нибудь точки, молекула внезапно перескакивает в новое место и т. д. (длительность «оседлого» состояния составляет в среднем одну стомиллиардную долю секунды; за это время молекула успевает сделать несколько десятков колебаний).

§ 5. Закон Авогадро.

Атомная и молекулярная масса

1. Итальянский физик Авогадро предположил (в 1811 г.), что различные газы в одинаковых объемах содержат одинаковое количество молекул, если температуры этих газов и давления одинаковы. Впоследствии это предположение подтвердилось, так что его стали называть законом¹.

2. Закон Авогадро позволяет легко сравнивать друг с другом массы молекул и атомов разных веществ. Самым

¹ Чтобы понять, какие факты навели Авогадро на это предположение, рассмотрим некоторые следствия этого закона. Молекула перекиси водорода H_2O_2 содержит поровну атомов Н и О. Из закона Авогадро следует, что для образования любого количества перекиси требуются одинаковые объемы водорода и кислорода. Молекула воды содержит атомов Н вдвое больше, чем О. Поэтому для образования воды требуется водорода по объему вдвое больше, чем кислорода. Это «правило объемов» было установлено опытным путем в начале XIX века. Для его объяснения Авогадро и выдвинул свою гипотезу.

легким оказался атом водорода, поэтому его массу приняли за единицу и назвали атомной единицей массы (а. е. м.). Впоследствии оказалось более удобным принять за атомную единицу массы $\frac{1}{12}$ долю массы атома углерода. Эта единица отличается от первоначальной меньше чем на 1%, так что в тех случаях, когда большой точности не требуется, не будет ошибкой считать атомной единицей массу атома водорода.

Масса данного атома, выраженная в атомных единицах массы, называется его *атомной массой*, а масса молекулы в этих же единицах — *молекулярной массой*.

§ 6. Число Авогадро

1. Многие закономерности в физике и химии приобретают наиболее простой вид, если относить их к порциям, содержащим одинаковые количества молекул¹. В физике и химии в качестве стандарта выбрали число $6 \cdot 10^{23}$ (точнее, $6,02 \cdot 10^{23}$). Порция вещества, содержащая $6 \cdot 10^{23}$ частиц, называется *молем*. Например, моль электронов содержит $6 \cdot 10^{23}$ электронов, моль атомов — $6 \cdot 10^{23}$ атомов, моль молекул — $6 \cdot 10^{23}$ молекул. Число частиц в одном моле называют *числом Авогадро*:

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ частиц/моль.}$$

Число молей в данной порции вещества называется *количеством вещества*.

2. Почему в качестве «стандартного» выбрали число $6 \cdot 10^{23}$, а не более «круглое» число? Число Авогадро подобрано так, чтобы моль частиц, у которых а. е. м. = 1,

¹ Подобно этому, многие закономерности, касающиеся населения, — показатели рождаемости, смертности, обеспеченности медицинским обслуживанием и т. п. — становятся ясными, если относить их к одинаковым по численности группам населения (обычно на группу в 1000 человек).

имел бы массу точно в 1 г, т. е. 10^{-3} кг. Ясно, что если масса частицы в m_r раз больше единицы, то моль этих частиц будет иметь массу в m_r раз больше. Таким образом, масса M одного моля частиц

$$M = m_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль,}$$

где m_r — молекулярная (или атомная) масса данного вещества. Например, найдя в таблице Менделеева для водорода $m_r = 1,008$ а. е. м., а для кислорода $m_r = 16$ а. е. м., находим:

а) масса одного моля атомов водорода

$$M = 1,008 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль;}$$

б) масса одного моля молекул водорода

$$M = 2,016 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль;}$$

в) масса одного моля молекул кислорода

$$M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Массу одного моля молекул (выраженную в кг/моль) называют *молярной массой данного вещества*.

3. Из закона Авогадро следует, что моль любого газа при данной температуре и давлении имеет один и тот же объем. В частности, при нормальных условиях (т. е. при $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па) этот объем, как показывает простой расчет, равен

$$V_M = 22,4 \text{ л/моль} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль.}$$

Упр. 1. Рассчитайте объем моля молекул водорода (считая его неизвестным) при нормальных условиях, если известно, что плотность водорода при нормальных условиях $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$ (напоминаем, что плотностью называется отношение массы тела к его объему: $\rho = \frac{m}{V}$).

Упр. 2. Используя данные, приведенные в этом параграфе, рассчитайте молярную массу воды.

Упр. 3. а) Шесть одинаковых монет имеют общую массу 18 г. Рассчитайте массу одной монеты; б) $6 \cdot 10^{23}$ молекул воды имеют суммарную массу $18 \cdot 10^{-3}$ кг. Рассчитайте (в кг) массу одной молекулы; в) рассчитайте массу одной молекулы (в кг), считая известными молярную массу M данного вещества и число Авогадро N_A .

Упр. 4. а) Сколько молей содержится в объеме кислорода массой $m = 320 \cdot 10^{-3}$ кг? б) Сколько молекул содержится в этой массе кислорода?

Упр. 5. Имеется порция вещества массой m . Молярная масса этого вещества равна M , число Авогадро равно N_A .

а) Сколько молей заключено в этой порции вещества?

б) Сколько молекул имеется в этой порции?

Упр. 6. В стакане содержится 200 г воды. Сколько молекул содержится в этой воде? **О т в е т:** $7 \cdot 10^{24}$.

Упр. 7. Если собрать всю воду на Земле, содержащуюся в реках, озерах, морях и океанах, то получится прямоугольный бассейн длиной 40 000 км, шириной 12 500 км и глубиной 3 км. Предположим, что в такой бассейн выплеснули стакан воды (см. предыдущее упражнение) и равномерно размешали. Сколько молекул из этого стакана окажется в каждом стакане океанской воды? **О т в е т:** около 1000.

Упр. 8. Рассчитайте среднее расстояние между соседними молекулами газа при нормальных условиях.

У к а з а н и е. Представьте, что объем одного моля газа разбит на одинаковые кубики и в каждом кубике «проживает» по одной молекуле. Очевидно, ребро такого кубика будет равно искомому расстоянию. **О т в е т:** $3,3 \cdot 10^{-9}$ м.

§ 7. Масса и размеры молекул

1. Зная число Авогадро, молярную массу вещества и его плотность, легко рассчитать массу молекул (выраженную в кг) и оценить их размеры. Определение массы молекулы напоминает такую задачу: $N_A = 6$ одинаковых монет имеют суммарную массу $M = 18$ г. Какова масса одной монеты? Ясно, что искомая масса $m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{18}{6} = 3$ г.

Аналогично, если N_A одинаковых молекул имеет суммарную массу M , то масса одной молекулы $m_0 = \frac{M}{N_A}$. Напри-

мер, масса молекулы водорода $m_0 = \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} =$
 $= 3,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, масса молекулы воды $m_0 = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} =$
 $= 30 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ и т. д.

2. Размеры молекул легко оценить, если предположить, что в жидких и в твердых телах они расположены вплотную друг к другу. Основанием для такого предположения служит то, что эти тела в отличие от газов почти не поддаются сжатию. Рассчитаем, например, размер молекулы воды. Для упрощения представим молекулы в виде кубиков, расположенных вплотную друг к другу (если молекула имеет другую форму, то таким путем мы найдем размер ячейки, в которой «проживает» молекула).

а) Сначала найдем объем одного моля воды:

$$V_M = \frac{M}{\rho} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{10^3 \text{ кг/м}^3} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль};$$

б) теперь легко рассчитать объем одной молекулы (одного кубика):

$$V_1 = \frac{V_M}{N_A} = \frac{18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} = 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3;$$

в) теперь найдем ребро кубика (размер молекулы):

$$d = \sqrt[3]{V_1} = \sqrt[3]{30 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Расчет, сделанный другими, более точными методами, подтверждает эту оценку (диаметр молекулы воды, если условно считать ее шариком, равен $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$). Размеры молекул других веществ (если они состоят не более чем из двух-трех атомов) имеют тот же порядок величины (от $2 \cdot 10^{-10}$ до $4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$).

Упр. 1. Оцените размер атома железа, если его атомная масса 64 а. е. м., а плотность железа $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

О т в е т: $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Упр. 2. Оцените размер молекулы жидкости, молярная масса которой M , а плотность ρ .

ГЛАВА 2

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

§ 8. Давление жидкостей и газов (повторение)

1. Давлением называют величину, численно равную силе, действующей на единицу площади, перпендикулярно к ней:

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

Единица давления в системе СИ называется паскаль:
 $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$.

2. Среднее давление, создаваемое атмосферой на уровне моря, называется нормальным. Эта величина равна 10^5 Па (более точно $1,013 \cdot 10^5$ Па).

3. Неподвижные жидкости и газы передают внешнее давление по всем направлениям без изменения (закон Паскаля).

4. Поскольку жидкость находится в состоянии покоя, то, чтобы найти давление, созданное столбом жидкости на глубине h , надо силу тяжести этого столба поделить на его площадь:

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh,$$

где $\rho = \frac{m}{V}$ плотность жидкости.

Упр. 1. На какой глубине под водой полное давление (т. е. сумма атмосферного давления и давления, созданного силой тяжести воды) вдвое больше атмосферного давления (нормального)?

Упр. 2. В вакуумной камере стоит бочка высотой 1 м, заполненная водой. В боковой стенке возле дна имеется

пробка, затыкающая отверстие площадью 10 см^2 . С какой силой вода действует на пробку? Изменится ли ответ, если бочка находится не в вакууме, а в воздухе?

§ 9. Идеальный газ

1. При нормальных условиях (т. е. при нормальном давлении и температуре 0°C) расстояние между молекулами газа значительно (примерно в 10 раз) превышает их размеры. При таких условиях силами взаимодействия между молекулами можно пренебречь. Такой газ называют идеальным. В отличие от идеального, реальным называют такой газ, где эти силы играют заметную роль.

В моменты взаимных столкновений между молекулами идеального газа действуют силы, которые заставляют молекулы разлетаться. Но это продолжается очень короткое время, подавляющую же часть времени каждая молекула движется прямолинейно и равномерно. В этом смысле мы и считаем, что взаимодействие между молекулами идеального газа отсутствует.

2. При очень высоких давлениях, при обычных температурах, т. е. когда газ близок к жидкому состоянию, газ нельзя считать идеальным. Объясняется это тем, что высокие давления, как правило, получаются при большой плотности газа, когда молекулы тесно сближены. Ясно, что при тесном сближении нельзя пренебрегать взаимодействием молекул.

§ 10. Как рассчитать давление газа на стенку

1. Газ давит на стенки сосуда, в котором он находится, потому что молекулы ударяются о них. Если бы в сосуде было всего несколько молекул, то стенка испытывала бы давление только в момент удара, а в остальное время давление отсутствовало бы. Но так как в сосуде находится обычно невообразимо большое число молекул, то о стенку каждое мгновение ударяется огромное число молекул,

причем удары происходят непрерывно, а число ударов в каждое мгновение практически одинаково. Поэтому никакого увеличения или уменьшения давления в отдельные моменты времени обнаружить не удастся.

2. Чтобы рассчитать силу, с которой отдельная молекула при ударе действует на стенку, надо использовать второй закон Ньютона: $\vec{F} = m\vec{a}$, или $\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$ (вторая формула легко получается из первой:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}.$$

По традиции, при расчете ударов молекул используют вторую формулу, т. е. находят изменение импульса тела и делят это изменение на время, за которое это изменение произошло. Молекулы будем считать гладкими шариками, а удар о стенку — абсолютно упругим. Абсолютно упругим называется такой удар, после которого сохраняется суммарная кинетическая энергия сталкивающихся тел. При ударе о стенку она практически не получает никакой кинетической энергии (это можно строго доказать), значит, при таком ударе молекула отскакивает с той же скоростью, с какой налетела на стенку. Если молекула массой m_0 летела перпендикулярно к стенке со скоростью v (ось координат мы направим туда, куда летела молекула), то изменение ее импульса равно $m_0(-v) - m_0v = -2m_0v$. Согласно закону сохранения импульса, если молекула потеряла такой импульс, значит, стенка приобрела его (если ее ничто не держит). Значит, сила, действующая на стенку,

$$F = \frac{\Delta(m_0v)}{\Delta t} = \frac{2m_0v}{\Delta t}.$$

Если бы мы выбрали столь большое время Δt , что только часть этого промежутка сила действовала бы на стенку, то эта формула определила бы среднюю силу за время Δt .

3. Для расчета полной силы, действующей на стенку, надо учесть результаты ударов всех молекул, которые долетят до стенки за время Δt , и поделить суммарный им-

пульс, полученный стенкой за это время, на величину Δt . Чтобы найти давление, надо эту силу поделить на площадь стенки. Этим расчетом мы и займемся в следующем параграфе.

§ 11. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

1. Докажем, что давление газа на стенки выражается формулой

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2},$$

где p — давление газа, n — число молекул в единице объема (или иначе, концентрация молекул), $\overline{v^2}$ — среднее значение квадратов скоростей молекул. *Это уравнение называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории.*

Роль каждого множителя в формуле легко понять, если учесть, что давление газа создается ударами молекул о стенки сосуда. Сила, действующая на данную стенку, зависит от того, какой импульс получает она от ударяющихся о нее молекул за единицу времени. Пусть число молекул в сосуде удвоилось. Ясно, что удвоится число ударов, т. е. число импульсов, переданных стенке за единицу времени. Давление поэтому удвоится. Теперь представим, что каждую молекулу заменили другой, у которой масса вдвое больше (а скорость такая же). Тогда вдвое больше станет и импульс, переданный стенке от каждой молекулы. Давление снова повысится вдвое. Пусть теперь удвоилась скорость молекул. Каждая молекула имеет теперь удвоенный импульс, поэтому толчок от каждой молекулы будет вдвое сильнее. Но это не все. Молекулы станут ударяться о стенки вдвое чаще (подобно тому, как вдвое чаще станут приходить рейсовые автобусы на свой конечный пункт, если их скорость удвоится). Поэтому давление еще раз удвоится, т. е. всего увеличится в 4 раза (а в общем случае давление будет пропорционально квадрату скорости).

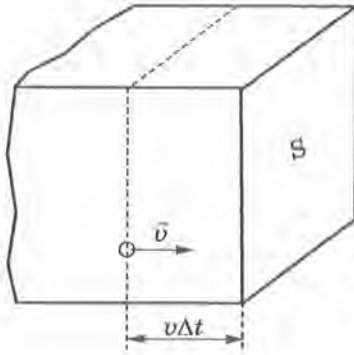


Рис. 6

2. Эти качественные рассуждения не дают возможности установить величину коэффициента пропорциональности (равного $1/3$), поэтому проведем формальный вывод этого уравнения. Примем для определенности, что сосуд имеет форму куба. Кроме того, сначала будем считать, что скорости v всех молекул одинаковы по модулю и что они друг с другом не сталкиваются.

Ввиду беспорядочности движения можно предположить, что результат ударов о стенку будет таким же, как если бы одна треть всех молекул двигалась параллельно одному ребру, другая треть — параллельно другому, третья — параллельно третьему (расчет, сделанный без этого упрощения, подтверждает, что результаты получаются такими же). Из этой трети половина молекул летит к интересующей нас стенке, другая половина — к противоположной. Таким образом, к каждой стенке летит $1/6$ часть всех молекул.

Рассчитаем, сколько молекул ударится о данную стенку за некоторое время Δt . За это время до стенки успеют долететь молекулы, отстоящие от нее на расстояние $v\Delta t$ (рис. 6), и все более близкие, т. е. все молекулы, находящиеся в объеме $v\Delta tS$. Число молекул, находящихся в этом объеме и летящих к данной стенке, равно $\frac{1}{6}nv\Delta tS$, где n — число молекул в единице объема.

3. Найдем силу, испытываемую стенкой в результате этих ударов. Когда молекула массой m_0 , летевшая со скоростью v , упруго отскакивает от стенки, изменение ее импульса равно $2m_0v$, и такой же импульс получает согласно

закону сохранения импульса стенка. Если бы эти молекулы не ударялись и о противоположную стенку, то куб начал бы двигаться вправо. В нашем же случае он останется на месте (импульс, полученный правой стенкой от налетевшей на нее молекулы, в конечном счете будет передан молекуле, отскочившей от противоположной стенки). Суммарный импульс, полученный стенкой за время Δt , равен $2m_0v$, помноженному на число ударов, полученных стенкой за это время, т. е. $2m_0v \cdot \frac{1}{6}n\nu\Delta tS$. Чтобы найти среднюю силу, испытываемую стенкой, надо это выражение разделить на Δt , а чтобы найти давление, надо эту силу поделить на площадь S стенки:

$$p = \frac{2m_0v \cdot \frac{1}{6}nS\nu\Delta t}{\Delta tS} = \frac{1}{3}nm_0v^2. \quad (1)$$

4. Если сделать более подробный вывод, учитывая, что скорости разных молекул различны, формула получится такой:

$$p = \frac{1}{3}nm_0 \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right), \quad (2)$$

где N — полное число молекул в данном сосуде.

Величина, взятая в скобки, есть среднее значение квадратов скоростей молекул и обозначается так: $\overline{v^2}$. Окончательно имеем

$$p = \frac{1}{3}nm_0\overline{v^2}, \quad (3)$$

где $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$. Корень квадратный из этой величины называют средней квадратичной скоростью молекул.

5. При выводе формулы (3) мы не учитывали столкновений молекул друг с другом. Как повлияет на результат учет этих столкновений? Легко понять, что никак. В самом деле, если из-за столкновений группы молекул, скорости которых были заключены в интервале между v и $v + \Delta v$, ови

получают некоторые другие скорости, то ввиду полной беспорядочности движения столько же молекул получают скорости, лежащие в этом интервале (подобно этому, если в большом универсаме группа покупателей покинет данный зал, это вовсе не значит, что число покупателей в этом зале уменьшится — их заменят покупатели, пришедшие из других залов). Таким образом, число молекул, скорости которых находятся в данном интервале скоростей, остается постоянным.

Упр. 1. Рассчитайте среднее и среднеквадратичное значения чисел 1, 2, 3.

Решение. $\bar{N} = \frac{1+2+3}{3} = 2,$

$$\sqrt{N^2} = \sqrt{\frac{1^2+2^2+3^2}{3}} = \sqrt{\frac{14}{3}} = 2,16.$$

Упр. 2. Докажите, что $\overline{m_0 v^2} = m_0 \overline{v^2}.$

§ 12. Понятие о температуре

Одной из важных величин, характеризующих свойства газа, является температура. Первоначальное понятие об этой величине возникло на основе наших ощущений: тела могут быть холодными, теплыми, горячими. Для количественной оценки степени нагретости тел вводится понятие о температуре. Для измерения температуры нельзя полагаться на наши ощущения. Во-первых, они необъективны: один может считать воду для купания теплой, другой — холодной. Во-вторых, не видно, как на основе ощущений можно установить количественную меру температуры, и, наконец, мы не можем дотрагиваться до очень горячих или очень холодных тел. Для измерения температуры надо использовать объективные физические явления.

Сначала установим объективный признак, на основе которого мы можем считать температуры двух данных тел одинаковыми. Наблюдения показывают, что если привести в соприкосновение два тела, степени нагрева ко-

торых, насколько мы можем судить по нашим ощущениям, явно различны, например, сосуд с очень горячим и очень холодным газом, то некоторое время давление газов или их объем, или то и другое вместе, будут меняться (если сосуды сделаны так, что их объемы практически не могут меняться, то будет меняться только давление). Через некоторое время объем и давление газов перестанут меняться. Такое состояние тел, когда их макроскопические¹ параметры не меняются, называют *термодинамическим равновесием*. Неизменность макроскопических параметров означает, что не меняются размеры тел, давление, плотность, агрегатное состояние. Температуры тел, находящихся в термодинамическом равновесии, будем считать одинаковыми. Например, когда объем ртути в ртутном термометре перестанет меняться, мы будем считать, что его температура такая же, как у тела, с которым он соприкасается.

§ 13. Построение температурной шкалы

При нагреве и при охлаждении тел могут меняться все их физические свойства: их размеры, их упругие свойства, их электрическое сопротивление и т. д. Любое из этих изменений можно использовать для измерения температуры. Первые термометры были ртутными; о температуре судили по изменению объема ртути. Для построения шкалы условились температуру тающего льда считать равной 0° , а кипящей воды — 100° . Шкалу между этими точками поделили на 100 равных частей и продолжили в обе стороны. Такую шкалу назвали шкалой Цельсия.

¹ Макроскопическими называют величины, характеризующие результат совместных действий миллиардов молекул либо характеризующие всю эту совокупность. Примерами макроскопических величин являются давление газа, его масса, объем, плотность, температура. В противовес макроскопическим рассматриваются «микроскопические» величины, такие как масса молекулы, ее размеры, скорость и т. д.

Если вместо ртути взять другую жидкость, то показания такого термометра для температур, отличных от 0° и 100° , разойдутся (хотя и незначительно) с показаниями ртутного термометра. Выходит, что построенная таким способом температурная шкала зависит от выбора «термометрического тела», а так как выбор ртути является случайным, то случайна и ртутная шкала. Мало шансов, что при такой «случайной» шкале законы природы, связанные с температурой, будут иметь наиболее простой вид.

Для выбора наиболее подходящего термометрического тела надо иметь какую-то теоретическую основу. Если такой основы нет, представляется разумным взять такое тело, которое в остальных своих свойствах подчиняется самым простым закономерностям. Таким телом, как мы увидим дальше, является идеальный газ (практически это означает достаточно разреженный газ). Закономерности, свойственные идеальным газам, сначала были установлены с определенной степенью точности с помощью ртутного термометра, и лишь после этого была построена более совершенная температурная шкала, где термометрическим телом являлся идеальный газ (ближе всего к свойствам идеального газа подходит разреженный водород или гелий). Этому историческому пути будем следовать и мы.

§ 14. Закон Шарля

1. Французский физик Шарль опытным путем обнаружил (в конце XVIII века), что при тех условиях, когда газы можно считать идеальными (т. е. если их давление мало отличается от нормального), они подчиняются простой закономерности. При повышении температуры любого газа на 1° его давление возрастает на $\frac{1}{273}$ долю того давления, которое было при 0°C , если объем газа и масса газа оставались неизменными (рис. 7). Если давление газа при 0°C обозначить p_0 , то:

— при нагреве на 1° прирост объема равен $\frac{1}{273} p_0$;

— при нагреве на 2° прирост объема равен $\frac{2}{273} p_0$;

— при нагреве на t° прирост объема равен $\frac{t}{273} p_0$.

Таким образом, «новое» давление $p = p_0 + \frac{p_0 t^\circ}{273}$, или

$$p = p_0 (1 + \gamma t^\circ), \text{ где } \gamma = \frac{1}{273} \text{ град}^{-1}.$$

Коэффициент γ называют *термическим коэффициентом давления*.

2. Установленная этим законом простая зависимость используется в газовом термометре. Схема его показана на рис. 7. О температуре газа судят по его давлению. На практике применяют не технический манометр, как показано на рис. 7, а ртутный. Обращаться с газовыми термометрами довольно сложно, поэтому обычно их используют только для градуировки других термометров.



Рис. 7

§ 15. Абсолютная шкала температур

1. Из закона Шарля следует, что при $t = -273^\circ\text{C}$ давление идеального газа обращается в нуль, а при более низких температурах должно стать отрицательным. Это наводит на мысль, что охлаждение тел ниже этой точки невозможно. Строгое доказательство этого утверждения дал (из других соображений) английский физик Кельвин в середине XIX века. Эту самую низкую температуру назвали абсолютным нулем (ее точное значение $t = -273,15^\circ\text{C}$, так как точное значение $\gamma = \frac{1}{273,15} \text{ град}^{-1}$). Именно эту точку естественно принять за нуль температурной шкалы. Такая шкала

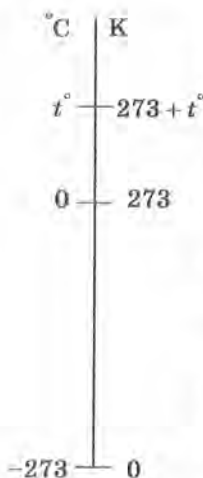


Рис. 8

называется абсолютной или шкалой Кельвина. Цена каждого деления в шкале Кельвина (один кельвин) принята такой же, как в шкале Цельсия. Переход из одной шкалы в другую, как видно из рис. 8, производится по формуле:

$$T = t^{\circ} + 273,$$

где T — температура по абсолютной шкале, а t° — по Цельсию.

2. Доказано, что достигнуть абсолютного нуля невозможно, но можно подойти к нему как угодно близко. В настоящее время достигнута (в кратковременном режиме) температура, лишь на одну десятитысячную долю кельвина отличающаяся от абсолютного нуля.

§ 16. Выражение закона Шарля через абсолютную температуру

Пусть при температуре t°_1 давление газа в закрытом сосуде было p_1 , а при t°_2 — p_2 . Согласно закону Шарля,

$$p_1 = p_0(1 + \gamma t^{\circ}_1), \quad p_2 = p_0(1 + \gamma t^{\circ}_2).$$

Разделив одно из этих выражений на другое, получаем:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + \gamma t^{\circ}_2}{1 + \gamma t^{\circ}_1} = \frac{1 + \frac{t^{\circ}_2}{273}}{1 + \frac{t^{\circ}_1}{273}} = \frac{273 + t^{\circ}_2}{273 + t^{\circ}_1} \rightarrow \boxed{\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}}.$$

Давление данной массы газа пропорционально его абсолютной температуре, если объем газа остается неизменным.

Упр. 1. В закрытом сосуде имеется газ при температуре $t^{\circ} = 27^{\circ}\text{C}$. При какой температуре его давление станет: а) вдвое больше первоначального? б) вдвое меньше первоначального? Ответ выразите в $^{\circ}\text{C}$.

§ 17. Связь абсолютной температуры с кинетической энергией молекул

1. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \overline{\frac{m_0 v^2}{2}}$$

следует, что среднее значение кинетической энергии беспорядочного движения молекул

$$\overline{\frac{m_0 v^2}{2}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{n}. \quad (1)$$

Применим это соотношение к газу, который находится в сосуде постоянного объема и у которого вначале давление и температура были нормальные ($p_0 = 10^5$ Па; нормальной называется температура, соответствующая 0°C , т. е. $T_0 = 273$ К). Концентрация n_0 молекул при этих условиях была равна $n_0 = \frac{N_A}{V_{\text{ом}}}$, где $V_{\text{ом}}$ — объем одного моля

при нормальных условиях. Если температура изменится от T_0 до некоторой T , то давление согласно закону Шарля изменится:

$$p = p_0 \frac{T}{T_0}, \quad (2)$$

а концентрация молекул не изменится: $n = n_0$. Подставляя (2) в (1), получаем:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_0 T}{T_0 n_0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_0 V_{\text{ом}}}{T_0 N_A} \cdot T. \quad (3)$$

Величина

$$k = \frac{p_0 V_{\text{ом}}}{T_0 N_A} = \frac{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}}{273 \text{ К} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \quad (4)$$

называется *постоянной Больцмана*. Единица ее измерения, как видно из формулы (3), равна $\left[\frac{m_0 v^2 / 2}{T} \right]$, т. е. Дж/К.

Окончательно имеем:

$$\boxed{\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT.} \quad (5)$$

2. При нашем расчете мы приняли, что при нормальной температуре T_0 давление p_0 данной массы газа было тоже нормальным. В этом случае оказалось, что $k = \frac{p_0}{T_0 n_0}$. В самом общем случае при некоторой температуре T_1 в газе могло установиться некоторое давление p_1 . В этом случае у нас в формулу (3) вошел бы коэффициент $k_1 = \frac{p_1}{T_1 n_1}$.

В следующем параграфе мы увидим, что это выражение во всех случаях равно одному и тому же числу, а значит, равно $\frac{p_0}{T_0 n_0}$. Таким образом, формулы (5) и (4) применимы во всех случаях.

3. Формула $\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ оказалась справедливой не только для идеальных газов, но и для любых других веществ (в том числе жидких и твердых). Мы получили очень важный вывод: *средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул тела пропорциональна его абсолютной температуре*. В частности, при абсолютном нуле тепловое движение прекращается (но сохраняется движение электронов в атомах и некоторые другие виды нетеплового движения, т. е. такого движения, которое нельзя прекратить никаким понижением температуры).

4. Из формулы (5) видно, что температуру можно измерять не в кельвинах, а в джоулях, например:

вместо утверждения $T = 1$ К мы могли бы говорить:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж},$$

вместо утверждения $T = 2$ К мы могли бы говорить:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж и т. д.}$$

Таким образом, *постоянную Больцмана можно рассматривать как переводный коэффициент*, с помощью которого можно переводить температуру из наиболее естественных для нее «энергетических» единиц в привычную для нас шкалу температур.

Упр. 1. Льдинке, находящейся в вакууме, сообщили очень большую скорость, так что кинетическая энергия всех молекул заметно увеличилась. Значит ли это, что температура льдинки увеличилась?

Упр. 2. Водород и кислород имеют одинаковую температуру. У какого из этих газов средняя скорость молекул (точнее, средняя квадратичная скорость) больше? Во сколько раз?

Упр. 3. Докажите, что $p = nkT$.

Упр. 4. Что такое абсолютный нуль температуры согласно молекулярно-кинетической теории?

§ 18. Уравнение Клапейрона—Менделеева

1. Выведем уравнение, связывающее между собой важнейшие макроскопические параметры газа. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$

и уравнения $\frac{\overline{m_0 v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$ легко получить

$$p = nkT.$$

Если подставить сюда $n = \frac{N}{V}$ (где V — объем сосуда, а N — число молекул в нем) и $N = N_A \frac{m}{M}$ (где N_A — число Авогадро, m — масса газа в данном сосуде, а M — молярная масса данного газа, так что $\frac{m}{M}$ — число молей в данной массе), то получим

$$p = \frac{N}{V} kT = N_A \frac{m}{M} \frac{kT}{V} \rightarrow \boxed{pV = \frac{m}{M} RT.}$$

Уравнение, связывающее три самых важных параметра: p , V , T , называют *уравнением состояния идеального газа*. Данную форму уравнения называют *уравнением Клапейрона—Менделеева*. Постоянную R называют *универсальной газовой постоянной*, так как она одинакова для всех газов:

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \text{ Дж(моль} \cdot \text{К)}, \quad R = kN_A = 8,3 \text{ Дж(моль} \cdot \text{К)}.$$

2. В предыдущем параграфе у нас осталось недоказанным утверждение, что выражение $\frac{p_1}{T_1 n_1}$ равно во всех случаях одному и тому же постоянному числу. Это легко доказать, используя уравнение Клапейрона—Менделеева:

$$\frac{p_1}{T_1 n_1} = \frac{p_1 V_1}{T_1 N_1} = \frac{p_1 V_1}{T_1 \frac{m}{M} N_A} = \frac{\frac{m}{M} R T_1}{T_1 \frac{m}{M} N_A} = \frac{R}{N_A},$$

где N_1 — полное число молекул в данном объеме V_1 . Поскольку опыт показывает, что уравнение Клапейрона—Менделеева правильно описывает поведение идеальных газов, делаем вывод, что *опыт подтверждает постоянство выражения* $\frac{p_1}{T_1 n_1}$.

Упр. 1. Определите массу кислорода, заключенного в баллоне емкостью $V = 10$ л, если при $t^\circ = -13$ °С давление в баллоне $p = 9$ МПа. **О т в е т:** 1,3 кг.

Упр. 2. Сколько килограммов кислорода было израсходовано из баллона емкостью $V = 10$ л, если до выпуска газа давление было $p_1 = 5$ МПа при температуре $t^\circ_1 = 27$ °С, а после упало до $p_2 = 3$ МПа, и баллон охладился до $t^\circ_2 = -23$ °С? **О т в е т:** 0,18 кг.

¹ Разумеется, это доказательство можно было и не приводить, поскольку сам факт справедливости уравнения Клапейрона—Менделеева означает, что те предположения, которые легли в основу его вывода, тоже правильны.

Упр. 3. Какая часть газа осталась в баллоне, давление в котором было 6 МПа, а температура 27 °С, если давление упало до 0,1 МПа, а температура понизилась до $t_3^{\circ} = -23^{\circ}\text{C}$.
О т в е т: 0,02.

Упр. 4. Рассчитайте плотность газа при давлении p и температуре T , если его молярная масса равна M .

О т в е т: $\rho = \frac{pM}{RT}$.

Упр. 5. Докажите, что для данной массы газа

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

(это уравнение тоже можно назвать *уравнением состояния идеального газа*).

У к а з а н и е. Напишите уравнение Клапейрона—Менделеева два раза: для состояния p_1, V_1, T_1 и для состояния p_2, V_2, T_2 .

Упр. 6. Выведите из уравнения Клапейрона—Менделеева формулу $p = nkT$.

Упр. 7. При температуре 300 К и давлении 500 кПа газ занимал объем 4 л. Какой объем займет эта же масса газа при нормальных условиях? О т в е т: 18,2 л.

§ 19. Частные случаи

уравнения состояния идеального газа

Во многих важных задачах приходится иметь дело с такими процессами, где остается постоянной масса данного газа и еще один из его параметров: p, V или T . В этих случаях из уравнения Клапейрона—Менделеева получаются более простые формулы. Рассмотрим все три частных случая.

а) Если объем газа остается постоянным (рис. 9), уравнение Клапейрона—Менделеева можно написать так:

$$p = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{V} T = \text{const} \cdot T. \quad (1)$$

Процесс, происходящий при постоянном объеме, называют изохорным, а график этого процесса — изо-

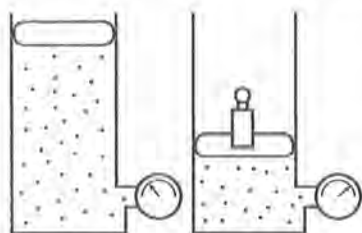


Рис. 13

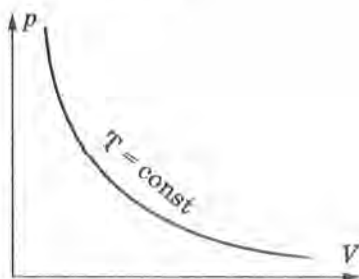


Рис. 14

Уравнение (3) можно иначе записать так:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (4)$$

Этот закон называют *законом Бойля — Мариотта* по фамилиям английского физика Бойля и французского — Мариотта, независимо друг от друга открывших этот закон (в XVII веке, в эпоху Ньютона). Его можно формулировать так: *произведение давления данной массы газа на его объем есть величина постоянная, если температура поддерживается неизменной.*

Упр. 1. Начертите в координатах $p(T)$ две изохоры для одной и той же массы газа. Первая относится к случаю, когда газ занимает объем V (эту изохору начертите под произвольным углом), а вторая — к случаю, когда газ занимает объем $2V$.

Упр. 2. Начертите в координатах $V(T)$ две изобары для одной и той же массы газа. Первая пусть относится к случаю, когда давление равно p , вторая — $2p$.

Упр. 3. Начертите в координатах $p(V)$ две изотермы для одной и той же массы газа. Первая относится к случаю, когда температура равна T , вторая — $2T$.

Упр. 4. В координатах $p(V)$ проведите через одну какую-либо точку три графика: изотермического, изобарического и изохорного процессов.

Упр. 5. В координатах $p(T)$ проведите через одну какую-либо точку три графика: изотермического, изобарического и изохорного процессов.

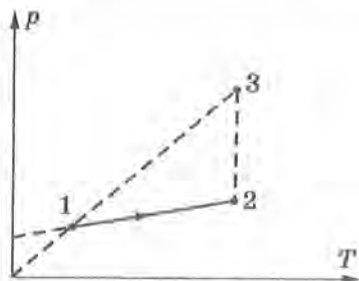


Рис. 15

Упр. 6. Когда температуру некоторой массы газа увеличивали и одновременно меняли объем, давление возрастало так, как показано на рис. 15 (сплошной линией). Объясните,

как при этом менялся объем газа: увеличивался или уменьшался?

У к а з а н и е. Считайте, что переход из состояния 1 в состояние 2 был произведен в два приема: сначала по изохоре 1—3, потом по изотерме 3—2.

Упр. 7. В баллоне емкостью 10 л находится воздух под давлением 30 МПа. Его соединили тонкой трубкой с баллоном емкостью 20 л, откуда воздух предварительно был выкачан. Какое давление установится в баллонах? В этой и следующих трех задачах температуру считать неизменной. **О т в е т:** 1 МПа.

Упр. 8. На глубине 20 м под водой находится пузырек воздуха объемом 1 мм³. Каким станет его объем, если он всплывет на поверхность? Атмосферное давление нормальное. **О т в е т:** 3 мм³.

Упр. 9. Давление данной массы газа увеличили изотермически вдвое. Как изменилась при этом плотность газа?

Упр. 10. В горизонтально расположенном цилиндре длиной H поршень, способный двигаться без трения, закреплен посередине цилиндра. Давление по одну сторону поршня (например, слева) в n раз больше, чем по другую сторону. На какое расстояние переместится поршень, если отпустить стопор? **О т в е т:** $\frac{H}{2} \cdot \frac{n-1}{n+1}$.

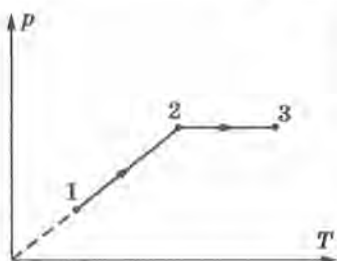


Рис. 16

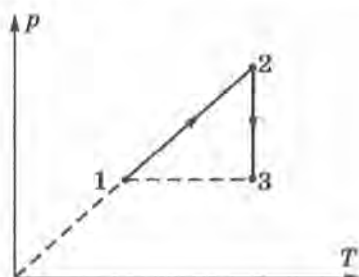


Рис. 17

Упр. 11. Попробуйте до того, как получен ответ к предыдущей задаче, угадать ответ для частных случаев: $n = 1$, $n = 0$, $n \rightarrow \infty$. Проверьте, что ответы соответствуют формуле.

Упр. 12. Абсолютную температуру данной массы газа удвоили. Как изменилась плотность газа: а) при изобарическом процессе; б) при изохорическом процессе?

Упр. 13. Выведите непосредственно из уравнения $p = nkT$: а) закон Шарля; б) закон Гей-Люссака; в) закон Бойля—Мариотта; г) закон Авогадро.

Упр. 14. На рис. 16 изображен график изменения состояния идеального газа в координатах $p(T)$. Представьте этот процесс в координатах $V(T)$.

Упр. 15. Представьте процесс, изображенный на рис. 17, в координатах $p(V)$.

§ 20. Закон Дальтона

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории можно вывести еще один закон, относящийся к смеси нескольких газов. Пусть в сосуде находится смесь (трех, например) газов. Выделим мысленно из всех молекул те, что принадлежат к первому газу. Пусть их число в единице объема равно n_1 . Из хода вывода основного урав-

нения молекулярно-кинетической теории следует, что давление, созданное только этими молекулами, равно

$$\frac{1}{3}n_1 m_1 \overline{v_1^2} = \frac{2}{3}n_1 \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{2}{3}n_1 \cdot \frac{3}{2}kT = n_1 kT.$$

Полное давление смеси: $p = n_1 kT + n_2 kT + n_3 kT$.

Каждое из этих слагаемых есть то давление, которое создавал бы в этом сосуде данный газ при отсутствии других. Это давление называют *парциальным давлением* данного газа. Таким образом, *давление смеси газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов*:

$$p = p_1 + p_2 + p_3.$$

Этот закон был открыт экспериментально английским химиком Дальтоном в 1801 г. и носит его имя.

Упр. 1. Имеются два одинаковых баллона. В одном находится кислород под давлением 200 кПа, в другом — азот под давлением 600 кПа. Какое давление установится в баллонах, если их соединить друг с другом? (Решите устно).

О т в е т: 400 кПа.

§ 21. Скорость теплового движения молекул

Из формулы $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$ можно рассчитать среднюю квадратичную скорость молекул:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

Например, для кислорода при комнатной температуре (300 К):

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}} \approx 480 \text{ м/с}.$$

Средняя скорость молекул, как показывает расчет, имеет тот же порядок величины, что и среднеквадратичная скорость (средняя скорость на 7,5% меньше среднеквадратичной).

Первая установка, на которой удалось измерить эти скорости (в 1920 г. это сделал немецкий физик Штерн), схематически изображена на рис. 18. Два жестко скрепленных друг с другом коаксиальных цилиндра находятся в вакууме. Вдоль оси цилиндров натянута проволока, накаливаемая током. С ее поверхности испаряются атомы. Скорость испарившихся атомов соответствует температуре нити. Часть атомов пролетает сквозь щель, сделанную во внутреннем цилиндре, и, долетев до наружного цилиндра, осаждается на его поверхности (стенки наружного цилиндра охлаждали, чтобы атомы лучше конденсировались на них).

Если привести прибор во вращение, то полоска появится в другом месте, так как за то время, пока атомы летят от щели до стенки, точка B против щели A , в которую они первоначально попадали, уйдет вперед по вращению на расстояние l , и атомы попадут в точку B' , отстоящую назад по направлению вращения цилиндров от точки B на то же расстояние $l = \omega R t$, где ω — угловая скорость вращения цилиндров, R — радиус

наружного цилиндра, t — время полета атомов от щели до стенки. Скорость атомов

$$v = \frac{R-r}{t} = \frac{R-r}{l/\omega R} = \frac{\omega R(R-r)}{l}.$$

Поскольку скорости разных атомов при данной температуре различны, полоска, полученная при вращении прибора, не является такой же узкой, как при неподвижном приборе.

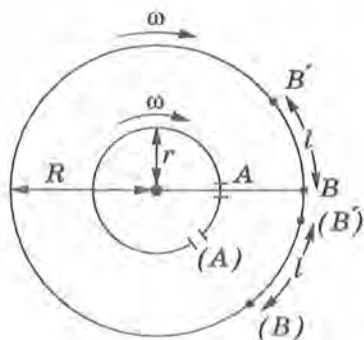


Рис. 18

Упр. 1. Смогли бы измерить скорость атомов в опыте Штерна, если вращали бы: а) только внутренний цилиндр; б) только внешний цилиндр?

Упр. 2. Какие атомы располагаются ближе к полоске, полученной при неподвижных цилиндрах: самые быстрые или самые медленные?

§ 22. Использование сжатых и разреженных газов

1. Повышение давления газа при увеличении температуры используется в тепловых двигателях. В двигателях внутреннего сгорания горячие газы, полученные при сгорании горючей смеси, давят на поршень, заставляя его перемещаться. При этом совершается работа (ради которой и построен двигатель). В реактивных двигателях благодаря повышенному давлению газообразных продуктов сгорания они с силой выбрасываются из сопла двигателя, получая определенный добавочный импульс; такой же импульс (но направленный в обратную сторону) получает двигатель. В паровых турбинах применяют нагретый до нескольких сотен градусов Цельсия водяной пар (который по существу тоже является газом). Струя пара, давление которого в десятки, а чаще в сотни раз больше атмосферного, направляется на лопатки турбины, заставляя вал турбины вращаться.

2. Сжатый воздух широко используется в разных пневматических инструментах: отбойных молотках, зубилах, сверлильных машинах. Они используются при строительных и дорожных работах, а также в горнорудном деле. Для их работы необходимы давления, в 6—7 раз превышающие атмосферное. Для получения сжатого воздуха (и других сжатых газов) применяют мощные насосы, называемые компрессорами. Велосипедный насос может создавать давление, лишь в 2—3 раза превышающее атмосферное, и подавать несколько литров воздуха в минуту. Современные компрессоры могут, если это требуется, создавать давления, в тысячи раз превышающие атмосферное, и подавать тысячи кубометров газа в минуту.

Компрессоры используются на металлургических заводах при производстве чугуна и стали. При производстве чугуна в доменную печь подается сжатый воздух для поддержания горения кокса. При производстве стали сжатый воздух или сжатый кислород продувают сквозь расплавленный чугун; часть углерода выгорает, и получается сталь.

Компрессоры нужны для перекачки газов по газопроводам, для перемещения по трубам сыпучих тел (цемента, угля, зерна), для получения жидкого кислорода и других сжиженных газов, для заполнения баллонов сжатым газом (баллоны со сжатым кислородом, водородом, ацетиленом используют при сварке). Сравнительно небольшие компрессоры имеются в поездах и еще меньшие — в трамваях. Они заполняют сжатым воздухом резервуары, питающие тормозные системы. Сжатый воздух используется также для открытия и закрытия дверей в вагонах метро, троллейбусах и т. д.

Пневматическая шина, заполненная сжатым воздухом, при наезде на мелкое препятствие вминается и тем самым предотвращает подскок колеса на высоту препятствия (в результате смягчаются толчки).

3. В технике широко используют и разреженные газы, в частности, вакуум. При нормальном давлении длина свободного пробега молекулы до первого столкновения с другой молекулой очень мала (несколько меньше 0,001 мм). В технике вакуумом называют такое разрежение, когда длина свободного пробега молекул соизмерима с размерами сосуда или даже превышает его. В этих случаях молекулы практически не сталкиваются друг с другом (это наступает при давлениях от 100 до 0,1 Па, в зависимости от размеров сосуда).

В вакуумных печах получают высококачественные стали и другие сплавы.

Высокий вакуум используется в кинескопах, рентгеновских трубках, многих других электронных приборах.

ГЛАВА 3

СВОЙСТВА ПАРОВ

§ 23. Испарение и конденсация

1. Наблюдения показывают, что при любой температуре жидкости испаряются: лужи в сухую погоду быстро высыхают, высыхает белье на веревке, сено и т. п. Сточки зрения молекулярной теории, испарение означает, что некоторые молекулы жидкости способны преодолеть притяжение своих соседей и вылететь наружу. При этом силы притяжения данной молекулы к поверхностному слою совершают определенную отрицательную работу, которую можно назвать работой выхода. Вылететь из жидкости могут только те молекулы, кинетическая энергия которых больше работы выхода¹:

$$\frac{mv^2}{2} > |A_{\text{вых}}|.$$

Чем выше температура, тем больше доля молекул, обладающих нужной для вылета энергией, и тем быстрее происходит испарение.

2. При испарении жидкость охлаждается. Объясняется это тем, что вылететь из жидкости могут только самые «богатые» энергией молекулы. Ясно, что средняя кинетическая энергия оставшихся молекул при этом уменьшается, а это означает понижение температуры оставшейся жидкости. Для того чтобы при испарении температура жидкости не менялась, надо подводить к ней тепло. *Количество тепла, которое надо подвести к жидкости, чтобы при неизменной температуре выпарить один*

¹ Совершенно аналогично сила тяжести, приложенная к брошенному вверх камню, совершает отрицательную работу $A = -mgh$. Перелететь забор высотой h могут только те камни, у которых $\frac{mv^2}{2} > mgh$.

килограмм, называется удельной теплотой парообразования.

3. Те молекулы пара, которые движутся в сторону жидкости и окажутся вблизи ее поверхности, втянутся в жидкость. Переход вещества из газообразного состояния в жидкое называют конденсацией. При втягивании молекул в жидкость их скорость возрастает, значит, возрастает и кинетическая энергия. Поэтому конденсация пара приводит к нагреванию жидкости (которая до этого находилась в тепловом равновесии с паром). *Из закона сохранения энергии следует, что теплота конденсации должна равняться теплоте испарения.* Например, если теплота конденсации была бы больше теплоты испарения, то можно бы было сделать машину, где жидкость сначала конденсировалась бы, а потом за счет теплоты конденсации снова испарялась бы. Каждый раз после такого круговорота мы получали бы «из ничего» некоторое количество теплоты. Это противоречит закону сохранения энергии.

4. Охлаждение жидкости при испарении используется в бытовых холодильниках (их работа описана в следующем параграфе). Другим примером использования этого явления может служить предохранение от перегрева космических кораблей, возвращающихся на Землю. Если не принять специальных мер, то в результате трения о воздух корабль может сгореть. Чтобы предотвратить это, его покрывают специальными составами, которые плавятся и быстро испаряются. При испарении покрытие охлаждается и спасает находящуюся под ней оболочку от перегрева.

Охлаждение при испарении и выделение теплоты при конденсации играет важную роль в природе, обуславливая умеренность климата приморских стран.

Упр. 1. Если из стакана воды отлить часть воды, то суммарная кинетическая энергия беспорядочного движения оставшихся молекул уменьшится. Означает ли это, что температура воды уменьшилась?

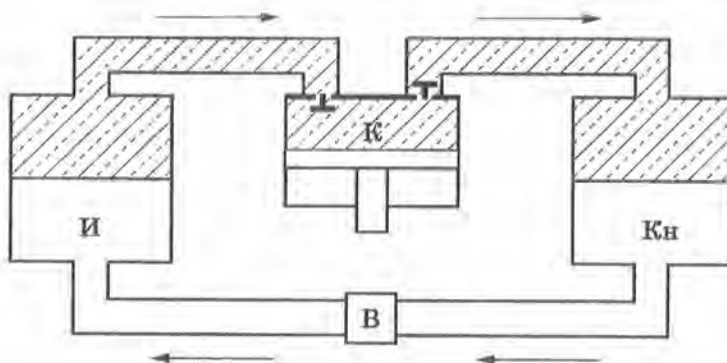


Рис. 19

Упр. 2. При испарении из жидкости вылетают самые «богатые» энергией молекулы. Означает ли это, что температура пара над жидкостью больше температуры жидкости?

Упр. 3. Почему, если дуть на горячий чай, он быстрее остывает?

§ 24. Устройство бытового холодильника

Охлаждение жидкости при испарении используется в домашних и промышленных холодильниках. Наибольшее распространение получили компрессорные холодильники, основными частями которых являются испаритель И, конденсатор Кн и компрессор К (рис. 19). Все эти части соединены друг с другом трубами и образуют замкнутую систему, заполненную рабочей жидкостью и ее паром. Предположим, что поршень компрессора неподвижен, оба его клапана закрыты и регулирующий вентиль В (т. е. кран) тоже закрыт. Испарения в этом случае происходить не будет, так как пары будут насыщенными (это означает, что число вылетающих из жидкости молекул равно числу возвращающихся в нее молекул).

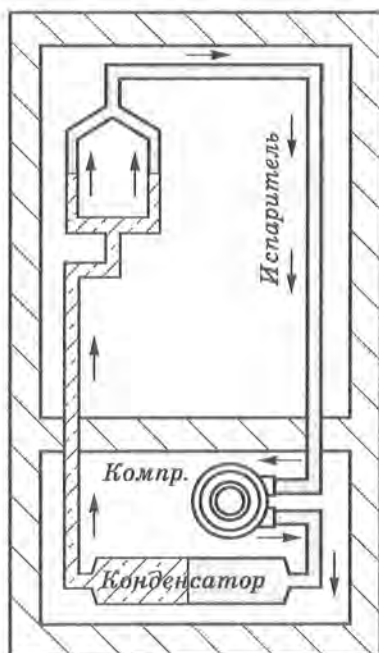


Рис. 20

Температура всех частей холодильника будет одинаковой. Пусть теперь поршень компрессора опустится вниз. Левый клапан при этом откроется, и пары из испарителя начнут отсасываться в компрессор. В испарителе начнется интенсивное испарение (или даже кипение), и температура его станет понижаться. Он начнет отнимать тепло от окружающей среды через металлические стенки испарителя. При обратном ходе поршня левый клапан захлопнется и откроется правый клапан. Давление паров в конденсаторе повысится, и там начнется конденсация пара. При этом жидкость в конденсаторе нагревается. Это тепло передается в комнату (так что при работе холодильника воздух в комнате несколько нагревается). В результате отдачи тепла жидкость в конденсаторе охлаждается почти до комнатной температуры.

Когда давление в конденсаторе превысит определенную величину, автоматически откроется регулирующий вентиль В и часть жидкости перейдет из конденсатора в испаритель. Весь процесс повторяется многократно, пока не будет достигнута нужная температура.

На рис. 20 показано расположение важнейших частей холодильника.

Температура всех частей холодильника будет одинаковой. Пусть теперь поршень компрессора опустится вниз. Левый клапан при этом откроется, и пары из испарителя начнут отсасываться в компрессор. В испарителе начнется интенсивное испарение (или даже кипение), и температура его станет понижаться. Он начнет отнимать тепло от окружающей среды через металлические стенки испарителя. При обратном ходе поршня левый клапан захлопнется и откроется правый клапан. Давление паров в конденсаторе повысится, и там начнется конденсация пара. При этом жидкость в конденсаторе нагревается. Это тепло передается в комнату (так что при работе холодильника воздух в комнате несколько нагревается). В результате отдачи тепла жидкость в конденсаторе охлаждается почти до комнатной температуры.

§ 25. Насыщенный пар

1. Рассмотрим, как происходит испарение в закрытом сосуде. Представим, что вначале в сосуде была перегородка, отделяющая жидкость от остальной части сосуда, где создан вакуум. Если перегородку убрать, молекулы начнут вылетать из жидкости. Если температура жидкости поддерживается постоянной, то число вылетающих в единицу времени молекул также будет постоянным. Часть молекул будет возвращаться в жидкость, причем число таких молекул будет расти по мере возрастания плотности пара. В конце концов число возвращающихся молекул сравняется с числом вылетающих. После этого плотность пара перестанет возрастать, наступит, как говорят, динамическое равновесие. *Пар, который находится в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.*

Если над жидкостью вместо вакуума находится воздух, то равновесие установится медленней, но оно по-прежнему наступит тогда, когда «возврат» молекул сравняется с их «вылетом». Поэтому плотность и давление насыщенного пара в обоих случаях (в вакууме и в воздухе) будут одинаковыми.

2. Как изменится давление насыщенного пара, если увеличить объем сосуда, например отодвинуть поршень от поверхности жидкости (рис. 21)? Представим для простоты, что все это произошло мгновенно. В первый момент динамическое равновесие нарушится, так как часть молекул пара уйдет в добавленный объем и концентрация

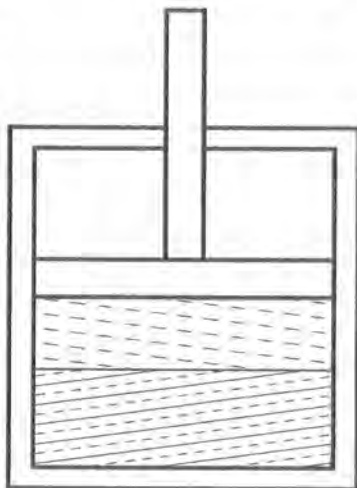


Рис. 21

молекул над поверхностью жидкости уменьшится. Поэтому уменьшится и число возвращающихся в жидкость молекул. Что же касается вылетающих из жидкости молекул, то их число не изменится, если температура жидкости поддерживается постоянной. В результате динамическое равновесие нарушится, и концентрация молекул пара начнет возрастать. Когда она достигнет первоначальной величины, динамическое равновесие восстановится. Поэтому восстановится и первоначальное давление ($p = nkT$). Если объем сосуда не увеличить, а, наоборот, уменьшить, то в первый момент концентрация пара возрастет, вследствие чего возврат молекул станет преобладать над вылетом. В результате концентрация пара начнет уменьшаться, пока не восстановится первоначальная концентрация, а стало быть, и первоначальное давление. Таким образом, давление насыщенного пара не меняется при изменении объема (если не учитывать кратковременный «переходный период»). На графике $p(V)$ этот процесс изобразится горизонтальной прямой (участок CB на рис. 22).

3. Между газом и паром нет никакой принципиальной разницы. Всякий газ является паром некоторой жидкости, например, кислород есть пар жидкого кислорода, азот — пар жидкого азота и т. д. Таким образом, пары должны подчиняться тем же законам, что и газы. Чем же объяснить, что насыщенный пар не подчиняется закону Бойля—Мариотта? Объясняется это тем, что при изменении объема сосуда меняется масса насыщенного пара, а из уравнения Клапейрона—Менделеева видно, что $pV = \text{const}$ лишь при постоянной массе газа.

Если объем сосуда увеличить настолько, чтобы вся жидкость перешла в пар (точка B на рис. 22), то при дальнейшем увеличении объема масса пара перестанет расти. Ясно, что для такого ненасыщенного пара соблюдается закон Бойля—Мариотта (участок BA графика).

Если объем сосуда уменьшить настолько, что под поршнем останется только жидкость (точка C на рис. 22),

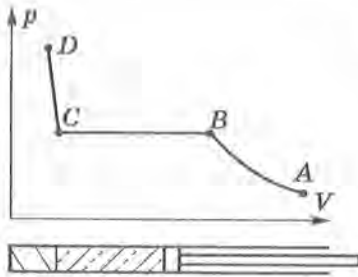


Рис. 22

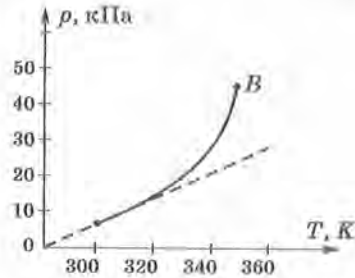


Рис. 23

то, поскольку жидкости почти не поддаются сжатию, при малейшем уменьшении объема давление жидкости резко возрастет (участок CD).

4. Рассмотрим, как зависит давление насыщенного пара от температуры. Если бы масса пара оставалась постоянной, то его давление, как это видно из уравнения Клапейрона—Менделеева, было бы пропорционально абсолютной температуре: $p = \frac{m}{M} \cdot \frac{RT}{V}$.

Но при увеличении температуры жидкости резко увеличивается доля молекул, кинетическая энергия которых больше работы выхода. Число молекул, переходящих в пар (а стало быть, и масса пара), резко возрастает, следовательно, резко возрастает его давление. Например, если абсолютную температуру воды, взятой при комнатной температуре, удвоить, то давление ее насыщенного пара увеличится в несколько тысяч раз! На рис. 23 показан график зависимости $p(T)$ для насыщенных паров воды. Для сравнения пунктиром показан график для идеального газа.

Упр. 1. Объясните, почему закон Бойля—Мариотта и закон Шарля не выполняются для насыщенных паров.

Упр. 2. На рис. 23 показана зависимость давления насыщенного пара от его абсолютной температуры. Предпо-

ложим, в точке B вся вода в сосуде полностью перешла в пар. Покажите (в своей тетради) дальнейший ход графика, если температуру продолжают повышать.

Упр. 3. Сколько граммов воды надо налить в сосуд объемом 1 л, чтобы она, испарившись при температуре $100\text{ }^\circ\text{C}$, создала давление 100 кПа?

О т в е т: Около 0,6 г.

§ 26. Кипение

1. В воде всегда есть растворенный в ней воздух. При нагревании растворимость воздуха уменьшается, и он выделяется в виде мельчайших пузырьков, которые собираются на стенках и на дне сосуда (кроме стенок и дна пузырьки могут собираться на твердых частицах, взвешенных в воде, и на ионах). Эти пузырьки, помимо воздуха, содержат насыщенные пары воды. Суммарное давление воздуха и пара уравнивает внешнее давление (которое практически совпадает с атмосферным), поэтому пузырьки не «захлопываются». Пузырьки прилепляются к стенкам и дну и не всплывают, несмотря на действие архимедовой силы (подобно тому, как капли воды или частицы пыли могут прилепляться к потолку, не падая). С повышением температуры жидкости объем пузырьков несколько возрастает. Давление воздуха в пузырьке уменьшается, и практически там остается только давление насыщенного пара. Когда давление насыщенного пара сравняется с атмосферным, пузырьки получают возможность неограниченного роста. С увеличением объема пузырька растет архимедова сила, и при некотором объеме она становится больше сил сцепления между пузырьком и стенкой. В этом случае пузырек отрывается от стенки, всплывает и лопаётся, выбрасывая пар. Этот процесс и называют кипением. Таким образом, *кипение происходит при такой температуре, когда давление насыщенного пара становится равным атмосферному давлению.*

Таблица

Давление насыщенных паров воды

t , °C	-20	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	300
P , кПа	0,10	0,61	2,3	7,4	20	47	101	198	361	618	1000	9000

2. Ясно, что при повышении внешнего давления температура кипения повышается, а при понижении — уменьшается. Например, можно сделать так, чтобы вода кипела при комнатной температуре. Из таблицы видно, что это произойдет при давлении около 2 кПа, что в 50 раз меньше нормального давления. Однако в таком «кипятке» не сварить яйца и не разварить мяса: белок свернется не потому, что из воды стали всплывать пузырьки, а потому, что вода горячая. Если требуется, чтобы воду можно было нагреть до температуры, превышающей 100 °C, т. е. чтобы вода закипала не при 100 °C, а при более высокой температуре, над водой создают повышенное давление. Например, в скороварках, где давление вдвое выше атмосферного, вода кипит при 120 °C. В химической и пищевой промышленности для увеличения скорости процессов применяют автоклавы — устройства, где вода кипит при температурах до 200 °C. Автоклавы применяются и в медицине для стерилизации хирургических инструментов и перевязочного материала.

3. Если в жидкости нет пузырьков воздуха, мелких частиц или ионов, без которых не могут возникнуть зародыши пузырьков, то ее можно нагреть на несколько десятков градусов выше температуры кипения без того, чтобы кипение в самом деле началось. Такая жидкость называется перегретой. Чтобы получить такую жидкость, надо ее профильтровать, затем прокипятить и лишить доступа воздуха.

4. *Температура кипящей жидкости в процессе кипения не меняется.* Так получается потому, что вся подводимая к жидкости теплота расходуется на испарение.

Если количество подводимого ежесекундно тепла внезапно увеличится, то увеличится и число выделяющихся пузырьков, т. е. скорость отвода тепла. Благодаря такому автоматическому регулированию температура в процессе кипения поддерживается неизменной.

§ 27. Влажность

В воздухе всегда присутствуют водяные пары, так что полное атмосферное давление складывается из давления сухой части воздуха и давления водяных паров. *Отношение давления тех паров, что находятся в воздухе, к давлению насыщенных паров при той же температуре называется относительной влажностью.* Выражают ее в процентах. Если относительная влажность 100%, т. е. пары насыщенные, то испарение в данном помещении не будет происходить. Чем меньше относительная влажность, тем быстрее будет происходить испарение. Таким образом, чтобы судить о том, каково будет самочувствие человека и каково будет поведение материалов, способных впитывать и испарять влагу, надо знать именно относительную влажность, а не абсолютную величину давления водяных паров.

Измерять относительную влажность можно разными способами. Чаще всего для этого применяют прибор, называемый психрометром. Он состоит из двух одинаковых термометров (рис. 24). Резервуар одного из них остается сухим, а другого закутан в полоску ткани, конец которой опущен в воду. Чем меньше относительная влажность, тем интенсивней идет испарение, и тем больше показания влажного термометра отличаются от показаний сухого термометра. По этой разности с помощью специальной таблицы, приложенной к психрометру, определяют влажность воздуха.

При температурах 20–25 °С наиболее благоприятной для человека является относительная влажность 40–60%. При очень малой влажности происходит быстрое испаре-

ние и высыхание слизистых оболочек носа и горла. В зимнее время это может быть причиной простуды. Слишком высокая влажность вызывает ощущение удушливости воздуха. В ряде производств требуется выдерживать в помещениях определенную влажность.

Влажность атмосферного воздуха является одной из самых важных характеристик климата, так как от нее зависит количество осадков, образование тумана и т. д.

Упр. 1. Пользуясь психрометрической таблицей, помещенной в задачнике, решите такую задачу. При температуре воздуха $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ влажный термометр показывал $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Каково будет его показание при понижении температуры воздуха до $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, если относительная влажность не изменилась? **О т в е т:** $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Упр. 2. Пользуясь таблицей, помещенной в предыдущем параграфе, определите, во сколько раз концентрация молекул (т. е. их число в единице объема) насыщенного пара при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше, чем при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

У к а з а н и е. Воспользоваться формулой $p = nkT$.
О т в е т: В 3,5 раза.

Упр. 3. Температура воздуха в комнате была $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50% . В стакан с водой, находившийся в комнате, стали кидать кусочки льда, так что температура стенок стакана понизилась до нуля. Запотеют ли стенки стакана?

У к а з а н и е. Можно использовать результат *упр. 2*.

Упр. 4. Если холодный предмет (например, очки) занести с улицы в комнату, то обычно он запотевает. Объясните, почему.

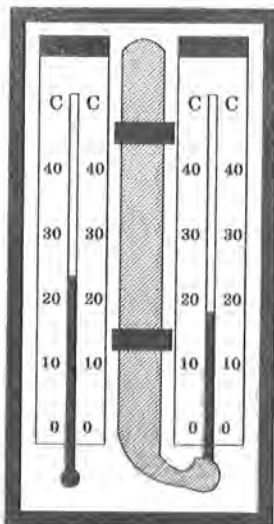


Рис. 24

ГЛАВА 4

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

§ 28. Свойства поверхности жидкости

1. Поверхность жидкости, граничащая с воздухом или другим газом, называется свободной. Наблюдения показывают, что свободная поверхность жидкости всегда стремится сократиться. Вот несколько примеров:

а) если на кольце, в двух точках которого привязана нитка, образовать мыльную пленку, то нить примет ту форму, которую она случайно приняла вначале (рис. 25а). Но если пленку проколоть по одну сторону нити, то другая часть пленки сожмется и натянет нить (рис. 25б);

б) мелкие капли жидкости (а в условиях невесомости и крупные) принимают форму шара. Из геометрии известно, что из всех тел данного объема шар обладает наименьшей поверхностью;

в) лопнувший мыльный пузырь никогда не принимает форму парашюта или лоскутков, а сворачивается в капли.

Таким образом, поверхность жидкости ведет себя, как растянутая резиновая пленка. Разница лишь в том, что при дальнейшем растяжении резины ее упругая сила растет, здесь же она (как мы увидим дальше) остается постоянной.

2. Стремление свободной поверхности жидкости сократиться объясняется действием молекулярных сил. На молекулу, находящуюся в глубине жидкости, действуют силы притяжения со стороны остальных молекул со всех сторон, так что результирующую этих сил можно считать равной нулю. Что же касается молекул поверхностного слоя, то для них результирующая этих сил направлена внутрь жидкости (рис. 26). Таким образом, молекулы, находящиеся на поверхности, стремятся уйти внутрь, и поверхность становится минимальной. По той же причине

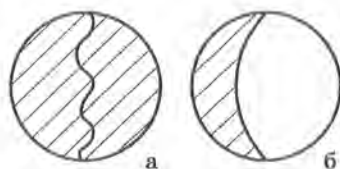


Рис. 25

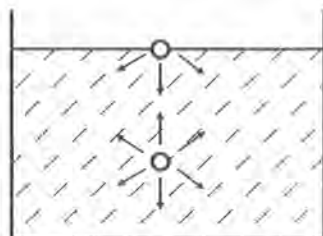


Рис. 26

толща сгрудившихся вокруг какого-либо зрелища принимает такую форму, когда ее периметр минимальный — никто не хочет оставаться «на поверхности», и там не остается ни одного лишнего человека.

Поскольку поверхность жидкости стремится быть минимальной, должны существовать силы, препятствующие увеличению поверхности. Очевидно, эти силы должны быть направлены вдоль поверхности по касательной к ней. Эти силы называют силами поверхностного натяжения.

§ 29. Поверхностное натяжение и способы его измерения

В каком бы месте мыльной пленки мы ни провели границу, разделяющую поверхность на две части (рис. 27), одна часть пленки будет действовать по всей длине границы на другую. Отношение силы поверхностного натяжения, действующей между двумя данными участками, к длине границы между ними называется *коэффициентом поверхностного натяжения*:

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

Эта величина измеряется в Н/м. Опыт показывает, что для каждой данной жидкости эта величина является постоянной при данной температуре (с ростом температуры она уменьшается).

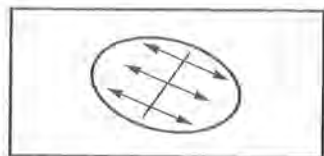


Рис. 27

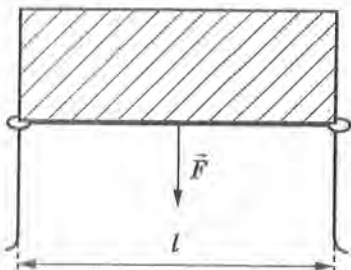


Рис. 28

2. Измерить коэффициент поверхностного натяжения можно разными способами. Особенно наглядно это можно сделать у мыльной пленки. Для этого надо натянуть пленку на проволочную рамку с легкой подвижной перекладиной (рис. 28) и измерить силу, удерживающую пленку от сокращения. Если эта сила равна F , а длина перекладины l , то коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = \frac{F}{2l}$. Множитель «2» фигурирует потому, что мыльная пленка имеет две поверхности (переднюю и заднюю), и вдоль

каждой из них действуют силы поверхностного натяжения.

Чтобы измерить коэффициент поверхностного натяжения воды, можно опустить на ее поверхность тонкую проволочку; при этом она прилипнет к поверхности воды (рис. 29). Если проволочку осторожно потянуть вверх, то за ней потянется тонкая пленка воды. Надо измерить силу F , при которой эта пленка рвется. Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = \frac{F}{2l}$.

§ 30. Давление под искривленной поверхностью жидкости

Натянутая резиновая пленка остается плоской лишь в том случае, когда давление по обе стороны пленки одинаково. Если с одной стороны давление будет больше, чем с

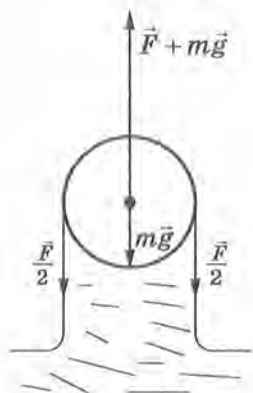


Рис. 29

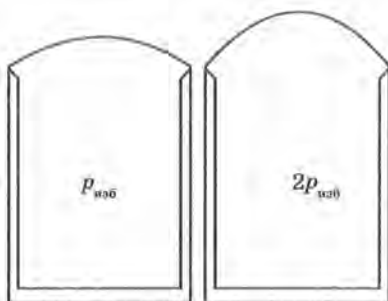


Рис. 30

другой, пленка искривится, причем вогнутость обращена в сторону большего давления (рис. 30). Чем меньше радиус кривизны поверхности, тем больше должно быть избыточное давление, поддерживающее ее в этом состоянии.

Все это относится и к искривленной поверхности жидкости. Для того чтобы поверхность жидкости оказалась искривленной, давление со стороны вогнутости должно быть больше, чем с обратной стороны. Например, внутри мыльного пузыря давление больше, чем снаружи. В этом легко убедиться на опыте: если выдуть на воронке пузырь и оставить воронку открытой, воздух будет выходить наружу и пузырь начнет стягиваться.

Упр. 1. Одинаково ли давление в воздушном пузырьке, возникшем в жидкости, и в самой жидкости (на том же уровне)?

§ 31. Явление смачивания и несмачивания

Если поместить на горизонтально расположенную стеклянную пластинку каплю воды, она растечется по всей пластинке. Если же стекло смазать жиром, капля воды соберется в шарик. В первом случае мы говорим, что

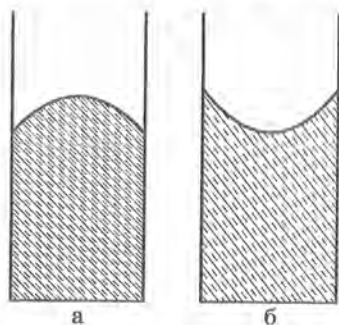


Рис. 31

жидкость смачивает твердое тело, во втором — что не смачивает. С молекулярной точки зрения первый случай означает, что силы притяжения молекул воды к стеклу больше, чем друг к другу, второй случай — что притяжение молекул воды друг к другу сильнее, чем к молекулам жира.

Форма поверхности жидкости в том месте, где она соприкасается с твердым телом, зависит от того, смачивает ли жидкость данное твердое тело или нет. Если не смачивает, то поверхность соприкосновения жидкости с твердым телом сокращается (рис. 31а), если смачивает, то поверхность соприкосновения увеличивается (рис. 31б). Если сосуд имеет форму тонкой трубки, то вся свободная поверхность оказывается искривленной и принимает сферическую форму.

§ 32. Капиллярные явления

1. Тонкие сосуды (у которых расстояние между стенками составляет не больше нескольких миллиметров) называют капиллярами (от латинского «капилля» — волос). Если капилляр опустить в широкий сосуд, заполненный жидкостью, то уровень жидкости в нем не будет таким же, как в широком сосуде. Если жидкость смачивает материал трубки, ее уровень в капилляре будет выше, чем в широком сосуде, если не смачивает, — то ниже (рис. 32).

Рассмотрим поведение жидкости, когда она смачивает материал трубки (например, поведение воды в стеклянном капилляре). Предположим, что сначала уровень жидкости в капилляре и в широком сосуде был одинаков.

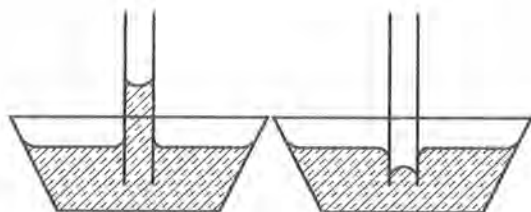


Рис. 32



Рис. 33

Жидкость начнет растекаться по стенкам капилляра и потянет за собой нижележащие слои жидкости. В условиях невесомости вода поднялась бы по всей высоте трубки и окутала бы ее (не только внутреннюю, но и наружную поверхность) сплошным слоем. В наших условиях вода будет подниматься до тех пор, пока силы поверхностного натяжения, действующие по окружности трубки (рис. 33), не уравновесятся силой тяжести столба жидкости $\sigma 2\pi R = mg$.

Если внутренний радиус трубки равен R , высота столба h , а плотность жидкости ρ , то $mg = \rho Vg = \rho \pi R^2 hg$. Подставляя это в предыдущую формулу, получаем

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}.$$

2. Глубина опускания жидкости, не смачивающей стенки капилляра (например, ртути в стеклянной трубке), определяется этой же формулой.

В обоих случаях мы считали, что свободная поверхность жидкости в капилляре является не малой частью сферы, а представляет собой полную полусферу. В этом

случае принято говорить, что жидкость полностью смачивает (или полностью не смачивает) стенки капилляра.

3. Капиллярные явления играют большую роль в природе и технике. Многие тела имеют пористое строение и пронизаны мелкими, иногда невидимыми простым глазом, каналами. К ним относятся пряжа, сахар, мел, почва, растения и т. д. Соприкасаясь с такими телами, вода (или другая смачивающая эти тела жидкость) впитывается в них. Поэтому ткани промокают, керосин по фитилю керосиновой лампы поднимается вверх, вода по почвенным капиллярам поднимается к поверхности; подъем питательных растворов по стеблям растений в значительной части также объясняется явлением капиллярности.

При изготовлении писчей бумаги ее пропитывают специальными составами, закупоривающими капилляры (в противном случае она обладала бы качествами промокающей бумаги). В кирпичных домах стены могли бы отсыреть, если бы между фундаментом и стенами не делали прокладку из толя или другого материала, где нет капилляров. Уплотняя или, наоборот, разрыхляя почву, тем самым регулируют приток воды к ее поверхности, а стало быть, скорость высыхания почвы.

Упр. 1. На какую высоту поднимется вода в капиллярной трубке диаметром (внутренним) 0,1 мм? Коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 7,2 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

О т в е т: 28,8 см.

Упр. 2. На какую высоту поднимется вода между параллельными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 0,1$ мм? О т в е т: 14,4 см.

Упр. 3. Атмосферное давление равно p_0 , плотность жидкости ρ , высота поднятия (или опускания) жидкости в капилляре h . Чему равно давление непосредственно под свободной поверхностью столба жидкости в капилляре (рис. 31а и 31б)?

О т в е т: а) $p_0 - \rho gh$; б) $p_0 + \rho gh$.

ГЛАВА 5

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 33. Кристаллические и аморфные тела

1. Существуют два вида твердых тел: кристаллические и аморфные. Внешним признаком кристалла служит его форма — он всегда ограничен плоскими гранями и прямыми ребрами. Более *важным и общим свойством кристалла является то, что его свойства по разным направлениям различны*. Например, кристалл слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие листочки. Чтобы разрезать его в другом направлении, перпендикулярном к «легко расслаиваемому», надо приложить усилие, во много раз большее. При нагревании кристалл может расширяться по-разному в разных направлениях, а некоторые (например, графит) в одном направлении при нагревании расширяются, а в другом — сжимаются. Оптические и электрические свойства кристаллов также зависят от направления (например, скорость света по разным направлениям может быть различной). Скорость роста кристалла (когда он образуется из расплава или из перенасыщенного раствора) по разным направлениям также различна. Если бы он рос по всем направлениям с одинаковой скоростью, то всегда получалось бы тело в форме шара.

У аморфных тел свойства по разным направлениям одинаковы, они, как говорят, *изотропны* (от греческого «изос» — одинаковый и «тропос» — направление). Примерами аморфных тел являются стекло, всевозможные смолы, канифоль. Кристаллические тела *анизотропны* (частица «ани» означает отрицание от греческого «анизос» — неодинаковый).

2. Каким образом молекулярная теория объясняет различие в свойствах аморфных и кристаллических тел? У аморфных тел в расположении молекул нет определенного порядка. В кристаллах они расположены в опреде-

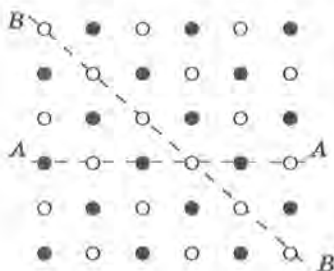


Рис. 34

ленном порядке. Если соединить отрезками прямых линий положения равновесия молекул в кристалле, то получится геометрическая фигура, называемая кристаллической решеткой. На рис. 5 показаны кристаллические решетки поваренной соли (слева) и графита (справа). Тепловое движение в кристаллах проявляется

в колебаниях молекул около положений равновесия.

Частицы, из которых состоит кристалл, во многих случаях являются не молекулами, а ионами. *Ионом называют атом (или группу атомов), потерявший или, наоборот, присоединивший к себе один или несколько электронов.* В первом случае ион является положительным, во втором — отрицательным. Поваренная соль является ионным кристаллом — в узлах ее решетки расположены ионы натрия (положительные) и хлора (отрицательные).

Именно благодаря строгому порядку в расположении частиц свойства кристалла различны по разным направлениям. Из рис. 5 видно, что расслаивать графит в одном из направлений легче, чем в другом. Это относится и к другим кристаллам с более симметричным расположением частиц, например, к кристаллу поваренной соли. Если в таком кристалле провести мысленно плоскости *AA* и *BB*, перпендикулярные плоскости чертежа (рис. 34), то густота расположения частиц в этих двух плоскостях будет разной. Расстояния между ближайшими частицами (расположенными по одну и по другую сторону плоскости) в этих случаях также будут различными. Ясно, что раскалывающие усилия будут в этих случаях разными. Опыт и теория показывают, что легче всего такой кристалл раскалывается по плоскости *AA*. Поэтому, ударив молотком по кубику поваренной соли, мы снова разобьем его на правильные кубики. Если мы мысленно проведем

разные плоскости в аморфном теле, то вследствие полной хаотичности в расположении атомов все плоскости будут в одинаковых условиях, поэтому стекло одинаково легко раскалывается по разным направлениям. Если стукнуть молотком по куску стекла, то получатся осколки самой разнообразной формы.

3. На первый взгляд может показаться, что кристаллических тел очень мало. Но это не так. Подавляющее большинство твердых тел, в том числе все металлы и большинство минералов, являются кристаллами. Но обычно их кристаллические свойства не проявляются. Тело полностью обнаруживает свои кристаллические свойства, если оно является *монокристаллом* (от греческого «монос» — единый), т. е. во всем объеме имеет единую кристаллическую решетку. Крупные монокристаллы иногда возникают в естественных условиях или же выращиваются искусственно. В большинстве же случаев твердые тела состоят из множества сросшихся маленьких кристалликов, ориентированных беспорядочно. Объясняется это тем, что рост кристалла из расплава или из раствора начинается, как правило, одновременно из большого числа центров. Такое тело называют *поликристаллом* (от греческого «поли» — много). Размеры отдельных кристалликов в металлах таковы (порядка 1 мкм или в несколько раз меньше), что их можно наблюдать под микроскопом в виде отдельных зерен. В поликристаллах не наблюдается различия свойств по разным направлениям. По любому направлению, проведенному внутри такого тела, встречается множество кристалликов, повернутых самым различным образом. Поэтому механическая прочность и другие свойства тела являются средней величиной, одинаковой для всех направлений.

§ 34. Плавление и отвердевание

1. Из курса механики известно, что устойчивое положение равновесия данной системы наступает тогда, когда потенциальная энергия системы меньше, чем в любом

другом близком состоянии. Например, система, состоящая из двух шариков, соединенных пружинкой (рис. 2), находится в устойчивом равновесии при таком расстоянии между шариками, когда пружина не сжата и не растянута. Как при увеличении этого расстояния, так и при его уменьшении потенциальная энергия системы увеличивается, так что в положении равновесия эта энергия минимальна. Подобно этому наиболее устойчивое положение молекул в теле наступает тогда, когда потенциальная энергия взаимодействия молекул принимает наименьшее значение. В кристаллическом теле это соответствует случаю, когда молекулы расположены в узлах кристаллической решетки. При небольшом увеличении или небольшом уменьшении этого расстояния потенциальная энергия тела возрастает.

При нагревании кристаллического тела увеличивается энергия колебаний его молекул. С достижением некоторой температуры (температуры плавления) кристаллическая решетка начинает распадаться. Подводимая при этом теплота идет не на нагрев тела, а на разрыв межмолекулярных связей. Поэтому при плавлении кристаллического тела, как и при кипении жидкости, температура не растет. *Количество тепла, необходимое для расплавления единицы массы данного вещества, называется удельной теплотой плавления этого вещества.* При обратном процессе — кристаллизации — тепло выделяется. Удельная теплота кристаллизации, как это следует из закона сохранения энергии, равна удельной теплоте плавления этого вещества. *Кристаллизация тела происходит при той же температуре, что и плавление.*

2. Только кристаллические тела имеют определенную температуру плавления и отвердевания. Аморфные вещества не имеют правильного строения, поэтому межмолекулярные силы в них в разных местах разные. При нагревании таких веществ некоторые связи разрываются при более низких температурах, чем другие. Поэтому такие вещества (стекло, смола, канифоль и т. д.) размягчаются постепенно и не имеют определенной температуры плавления.

§ 35. Упругие деформации твердых тел. Закон Гука

1. Деформацией называется изменение размеров или формы тела. Самыми простыми деформациями являются растяжение и сжатие. Только их мы и будем рассматривать. Из курса 9 класса известно, что при упругих деформациях возникает сила, пропорциональная деформации:

$$F_x = -kx.$$

Упругой называется такая деформация, которая исчезает после прекращения действия внешней силы. В той области физики, которая изучает деформации тел, деформацию обозначают Δl . Кроме того, под Δl и F всегда подразумевают абсолютные значения этих величин, так что закон Гука при изучении деформаций пишут так:

$$F = k\Delta l.$$

2. Возникновение силы упругости объясняется тем, что при деформации меняется расстояние между молекулами, из которых состоит тело. График зависимости межмолекулярных сил от расстояния между молекулами является кривой линией (рис. 3), но на малом участке любую гладкую кривую можно считать прямой. Таким образом, при малых отклонениях от положения равновесия межмолекулярные силы пропорциональны отклонению. Поскольку при деформации меняется расстояние между молекулами во всех слоях тела, на долю одного слоя приходится ничтожная доля всей деформации. Поэтому закон Гука выполняется при деформациях, в миллионы раз превышающих расстояния между соседними молекулами.

3. Рассмотрим более подробно, от чего зависит деформация тела (например, удлинение резинового шнура). Во-первых, из закона Гука следует, что $\Delta l \sim F$. Кроме того, как показывает опыт, Δl зависит от длины l тела, от

площади его поперечного сечения S и от упругих свойств того материала, из которого сделано данное тело:

$$\Delta l = \frac{Fl}{SE},$$

где E — коэффициент, характеризующий упругие свойства данного материала; он называется *модулем упругости*. У металлических тел (в том числе и у пружин) модуль упругости при растяжении и сжатии одинаков, но у некоторых тел (у дерева, бетона, пластмасс) он различен при этих двух деформациях.

4. Сила, действующая на единицу площади растягиваемого или сжимаемого тела, называется *механическим напряжением* или просто *напряжением*:

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

Напряжение измеряют в Н/м^2 , т. е. в паскалях. Если напряжение превысит определенную для данного материала величину, то после прекращения действия силы тело не восстановит своей первоначальной формы. Это напряжение называют *пределом упругости* ($\sigma_{\text{упр}}$). Закон Гука, как показывает опыт, выполняется лишь до тех пор, пока напряжение в материале не превысило предел упругости.

Упр. 1. У какого материала модуль упругости больше: у стали или у резины? Ответьте, не заглядывая в справочник.

Упр. 2. В каких единицах измеряется модуль упругости?

Упр. 3. Модуль упругости резины равен E . Какое напряжение надо создать в резиновом шнуре, чтобы первоначальная длина шнура удвоилась?

Упр. 4. Предел упругости «обычной» стали равен 400 МПа . Какой наибольшей массы груз можно подвесить к стальной проволоке сечением 1 мм^2 , чтобы не превысить предел упругости?

§ 36. Пластические деформации твердых тел

1. Если механическое напряжение в материале превышает предел упругости, то после прекращения действия силы деформация остается.

Ее называют остаточной, или пластической деформацией. Материалы, у которых пластическая деформация возникает при малых напряжениях, называют пластичными. Примерами таких материалов являются глина, пластилин, свинец. При достаточно больших напряжениях любой материал (если он не настолько хрупок, что ломается при малых деформациях) становится пластичным. Это используют при штамповке многих металлических изделий (из стали, алюминия и т. д.). При повышении температуры предел упругости многих материалов (например, стали) резко уменьшается, поэтому наряду со штамповкой при комнатной температуре (холодной штамповкой) широко используют штамповку при повышенной температуре (горячую штамповку).

2. Механизм пластической деформации может быть различным и во всех случаях имеет совсем другой характер, чем при упругой деформации. В кристаллах пластическая деформация обычно происходит вследствие соскальзывания слоев кристалла друг относительно друга вдоль «кристаллографических плоскостей» (рис. 35а и 35б). Из рис. 35б видно, что после такого смещения на смещенные частицы не действуют никакие «возвращающие» силы. Поэтому тело не возвращается в первоначальное состояние.

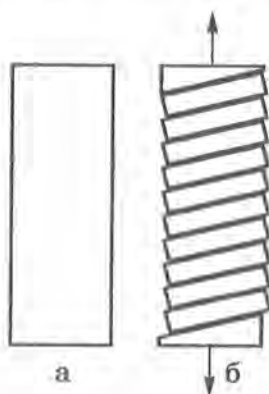


Рис. 35

§ 37. Предел прочности

Если продолжать деформировать тело после того, как пройден предел упругости, то в конце концов тело разрушается. Разрушающее напряжение называют *пределом прочности*. Разумеется, допустимое в конструкциях напряжение должно быть меньше предела прочности (обычно в несколько раз). Отношение этих величин (предела прочности к допускаемому напряжению) называют *запасом прочности*.

Упр. 1. Предел прочности гранита на сжатие 200 МПа. Какой наибольшей высоты можно построить гранитную стенку, чтобы она не разрушилась под собственной тяжестью? Плотность гранита 2500 кг/м^3 .

Упр. 2. Решите ту же задачу для кирпичной стенки. Плотность кирпича 1800 кг/м^3 , а предел прочности 18 МПа.

Упр. 3. «Обычная» сталь имеет предел прочности на разрыв 400 МПа. Какой массы гирию можно подвешивать к стальной проволоке сечением 1 мм^2 , если запас прочности принять равным 4?

Указание. Сначала сделайте расчет, приняв запас прочности равным единице.

Упр. 4. Опыт показывает, что если на стул поставить доску так, чтобы на ней уместилось 10 учеников, то стул не разламывается. Отсюда следует, что при изготовлении стульев принят, по меньшей мере, десятикратный запас прочности. Объясните, почему же в школе есть ломаные стулья?

§ 38. Проблема создания новых материалов

1. Успехи техники всегда были и всегда будут связаны с материалами, имеющимися в распоряжении людей. Целые периоды в истории человечества названы по используемым в этот период материалам (каменный век, длив-

шийся несколько сот тысячелетий, бронзовый век, пришедший на смену каменному, и, наконец, железный век, завершивший историю первобытного общества).

Новое направление в технике не может появиться и успешно развиваться, если нет нужных для его осуществления материалов. Появление железных дорог и пароходов в начале XIX века было бы невозможным, если бы к тому времени не научились получать чугун и сталь. Без материалов с нужными магнитными свойствами нельзя было бы строить генераторы для электростанций и электродвигатели. Только благодаря тому, что научились получать достаточно разреженные газы (с помощью специально созданных насосов), могла успешно развиваться радиотехника и электроника. Только после того, как научились получать сверхчистые материалы (где доля примесей иногда не превосходит миллиардной доли процента), смогли появиться транзисторы и другие полупроводниковые устройства. Дальнейший прогресс техники требует создания новых материалов с самыми разнообразными свойствами: сверхпрочных, сверхлегких, жаростойких, сверхчистых, с определенными электрическими и магнитными свойствами.

2. Долгое время создание новых материалов, обладающих нужными для практики свойствами, происходило случайно или в результате поисков «вслепую». Так, еще в первобытном обществе была создана бронза (первоначально так называли сплав меди с оловом), а затем научились получать и железо. Впоследствии подобным образом были созданы чугун, сталь и множество сплавов с разнообразными свойствами. За долгие годы своего существования металлургия и химия накопили немало наблюдений, позволяющих в некоторых случаях намечать пути создания новых материалов с нужными свойствами. Однако настоящее, «глубинное» понимание того, как макроскопические свойства тела (его прочность, его сопротивление электрическому току, его магнитные свойства и т. д.) зависят от свойств атомов, из которых оно состоит, и от их взаимного расположения, пришло только в

XX веке. Раздел физики, который занимается этим, называется физикой твердого тела. Только благодаря успехам физики твердого тела удалось создать транзистор, микропроцессор, современные ЭВМ, лазеры и другие устройства, созданные во второй половине XX века. Не исключено, что развитие физики твердого тела приведет к тому, что будущий металлург или будущий химик сумеет создавать новые материалы так же целенаправленно, как конструктор самолета создает новую машину. Конструктор может заранее определить, какие нужны ему двигатели и другие устройства, чтобы создать самолет с требуемыми характеристиками. Подобно этому, быть может, удастся заранее определять, какие атомы надо использовать, как они должны быть расположены и какими путями можно добиваться этого расположения, чтобы получить материал с заданными свойствами.

ГЛАВА 6

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 39. Предмет термодинамики

Термодинамика первоначально возникла как наука о тепловых машинах. В дальнейшем она превратилась в науку, которая изучает закономерности, связанные с превращениями энергии в любых процессах: тепловых, электрических, магнитных, химических и т. д. Термодинамика «в чистом виде» не опирается на представления молекулярно-кинетической теории, а выводится из нескольких «принципов», которые являются обобщением опытных фактов. Но многие понятия термодинамики (например, понятие о внутренней энергии) становятся более наглядными, если привлекать понятия и результаты молекулярно-кинетической теории.

§ 40. Внутренняя энергия

1. При изучении механики рассматривалось два вида энергии: потенциальная и кинетическая. В молекулярной физике и в термодинамике рассматривается еще один вид энергии: внутренняя. *Внутренней энергией тела называется сумма кинетической энергии хаотического движения его молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.* О том, что внутренняя энергия тела изменилась, мы можем судить по тем макроскопическим изменениям, которые происходят с телом: по изменению его температуры, агрегатного состояния, объема, формы, давления. Изменение температуры означает, что изменилась кинетическая энергия хаотического движения молекул. Изменение агрегатного состояния (например, при превращении льда в воду) означает, что изменилось вза-

имное расположение молекул, а стало быть, потенциальная энергия их взаимодействия. Если твердое тело сжать или растянуть, изменится расстояние между молекулами, стало быть, как и в предыдущем случае, изменится потенциальная энергия взаимодействия молекул.

2. В идеальном газе молекулы расположены настолько далеко друг от друга, что потенциальной энергией их взаимодействия можно пренебречь (по сравнению с кинетической энергией беспорядочного движения). Таким образом, внутренняя энергия идеального газа представляет собой только кинетическую энергию беспорядочного движения его молекул. Если газ одноатомный, то средняя кинетическая энергия молекулы равна $\frac{m_0 v^2}{2}$. Суммарная кинетическая энергия всех N молекул газа

$$U = N \cdot \frac{m_0 v^2}{2} = N \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT,$$

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT.$$

Такова внутренняя энергия идеального одноатомного газа массы m . В случае, если молекула состоит из нескольких атомов, помимо поступательного движения ее как целого, возможны вращения и колебания. Наличие этих дополнительных типов движения приводит к увеличению численного коэффициента в выражении для U .

Так, в случае газа из двухатомных молекул $U = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M} RT$.

Упр. 1. Одноатомный газ, масса которого m , а молярная масса M , нагрели от температуры T_1 до T_2 . На сколько увеличилась внутренняя энергия газа?

О т в е т: $\Delta U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$.

Упр. 2. На сколько увеличилась внутренняя энергия одного моля одноатомного идеального газа, если его температура увеличилась на 1 К?

О т в е т: $\frac{3}{2} R$.

§ 41. Количество теплоты

Когда один вид энергии переходит в другой, совершается работа, равная величине превращенной энергии. Например, когда тело свободно падает, сила тяжести совершает положительную работу. Точно на такую же величину возрастает кинетическая энергия тела и уменьшается его потенциальная энергия. Чтобы изменить внутреннюю энергию тела, также надо совершить определенную работу. Например, если тереть школьную резинку о бумагу, рука будет совершать определенную работу против силы трения, а резинка и бумага нагреются. Прирост внутренней энергии этих тел будет в точности равен совершенной работе.

Изменение потенциальной и кинетической энергии тел может происходить только путем совершения работы. Что же касается внутренней энергии, то ее изменение может происходить двумя способами: путем совершения работы или без ее совершения. Например, если резинка лежит на горячей подставке, то ее внутренняя энергия увеличивается, хотя никакой работы (макроскопической) не совершается. Процесс изменения внутренней энергии без совершения работы называется *теплопередачей*. Количество энергии, переданное в процессе теплопередачи, определяет некоторую величину, называемую *количеством теплоты* (Q).

Количество тепла, как и работа, — это не энергия, а мера перехода одного вида энергии в другой. Когда кончился процесс совершения работы или процесс передачи тепла, нельзя говорить, что в теле «содержится определенный запас работы» или «определенный запас тепла». Эти утверждения имели бы смысл, если бы внутренняя энергия могла меняться только одним способом. Можно говорить только об определенном запасе внутренней энергии тела.

Поясним это таким примером. Ванну можно заполнять водой либо через кран, либо через душ. Предположим (для полноты сравнения), что выпуск воды может

производиться тоже двумя способами: через обычное отверстие (кран) и через решетчатое (душ). Бессмысленно ставить вопрос, «каков запас душевой воды» или «каков запас крановой воды» в ванне. Мы можем не знать, каким из двух возможных способов заполнялась ванна и каким способом будут ее опорожнять. Определенной величиной является только запас воды в ванне.

§ 42. Первое начало термодинамики

Если внутренняя энергия тела меняется только путем теплопередачи, то прирост внутренней энергии равен, как это следует из предыдущего параграфа, количеству переданной ему теплоты $\Delta U = Q$. Но если одновременно внешние силы совершают над телом работу (например, если газ в цилиндре сжимают поршнем), то *прирост внутренней энергии*, как показывает опыт, *равен сумме этих двух величин*

$$\Delta U = Q + A_{\text{внеш}}, \quad (1)$$

где ΔU — прирост внутренней энергии тела, Q — количество тепла, переданного телу, а $A_{\text{внеш}}$ — работа внешних сил. Эта формула охватывает и такие случаи, когда изменение внутренней энергии тела вызвано взаимодействием с электрическими и магнитными полями. И в этом случае изменение внутренней энергии тела может произойти только двумя способами: либо при перемещении макроскопических тел, либо при неизменном расположении всех частей (в последнем случае говорят, что передача тепла происходит посредством излучения).

Формулу (1) называют *первым началом термодинамики*.

§ 43. Закон сохранения энергии

Тот факт, что существует внутренняя энергия, изменение которой определенным образом связано с величиной совершенной работы и с количеством переданной тепло-

ты, был установлен опытным путем. Когда этот факт был установлен (в середине XIX века), выяснилось, что при исчезновении механической энергии (например, после падения камня на Землю) возникает эквивалентное количество внутренней энергии и что существует много других видов энергии, но при любых превращениях выполняется закон сохранения энергии: *энергия замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы в ней ни происходили; она только превращается из одной формы в другую.*

Упр. 1. Различают такие формы энергии: потенциальная, кинетическая (их сумму называют механической), внутренняя, электромагнитная, химическая, ядерная. Какие превращения энергии происходят, когда из пистолета стреляют вверх и пуля потом падает на землю?

§ 44. Стандартная форма записи первого закона

В большинстве задач термодинамики удобно рассматривать не работу внешних сил над телом, а работу тела над внешними телами. Эти две работы различаются только знаками. Например, если поршень сжимает газ в цилиндре (рис. 36), то внешние силы, приложенные со стороны поршня к газу, совершают положительную работу, а силы, действующие со стороны газа на поршень, — отрицательную (причем, согласно третьему закону Ньютона, эти две силы равны по величине и противоположны по направлению).

Работу тела (газа) над внешними телами будем обозначать A без индексов. Поскольку $A = -A_{\text{внеш}}$, первое начало можно записать так: $\Delta U = Q - A$, или

$$Q = \Delta U + A$$

Эта формула читается так: *количество теплоты, полученной телом, идет на увеличение его внутренней энергии и на совершение работы над внешними телами.*

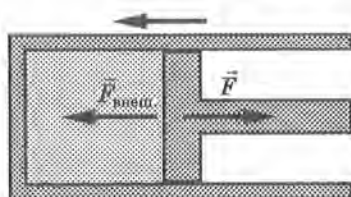


Рис. 36

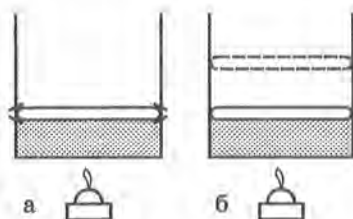


Рис. 37

Каждая из величин, входящих в формулу, может быть положительной или отрицательной. Напоминаем, что Q считается положительной, если тело получает тепло, а A — это работа тела (обычно газа) над внешними телами.

Упр. 1. Одноатомный газ, масса которого m , а молярная масса M , нагрели изохорно от температуры T_1 до T_2 . Какое количество тепла получил газ?

Ответ: $Q = \Delta U + A = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$.

Упр. 2. Один раз определенную массу газа нагрели на 1 К при постоянном объеме (рис. 37а), другой раз — при постоянном давлении (рис. 37б). Одинаковое ли количество теплоты было передано газу в обоих случаях?

§ 45. Расчет количества переданного тепла в простейших случаях

1. Опыт показывает, что количество теплоты, необходимое для нагревания массы m вещества от температуры T_1 до T_2 , пропорционально массе вещества и изменению температуры

$$Q = cm(T_2 - T_1).$$

При охлаждении тела оно отдает такое же количество тепла. Величина c называется *удельной теплоемкостью* данного вещества, а cm — *теплоемкостью данного тела*.

Чтобы расплавить кристаллическое тело массой m , доведенное до точки плавления, надо подвести к нему

$$Q = \lambda m.$$

При обратном процессе отвердевания (кристаллизации) такое же количество тепла выделяется и передается соседним телам. Величина λ называется *удельной теплотой плавления* данного вещества.

При парообразовании (и конденсации)

$$Q = r m,$$

где r — *удельная теплота парообразования* данного вещества. Каждой температуре соответствует свое значение r (в школьных задачниках указывается величина r при температуре кипения).

2. Если между несколькими телами происходит теплообмен и никакой работы при этом не совершается, то согласно закону сохранения энергии количество теплоты, отданное горячими телами, равно количеству теплоты, принятому холодными телами:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{получ.}}$$

Например, если нагретую гирю опустили в калориметр с холодной водой, то

$$Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

где Q_1 — тепло, отданное гирей, Q_2 — тепло, полученное калориметром, Q_3 — тепло, полученное водой. Подобные уравнения называют уравнениями теплового баланса. При решении задач на это уравнение надо следить, чтобы каждое слагаемое в левой и в правой части было положительным. Иногда все слагаемые этого уравнения пишут в одной части: $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$. В этом случае тепло, полученное телом, считается положительным, а отданное — отрицательным.

3. При сгорании топлива количество выделившегося тепла рассчитывается по формуле

$$Q = q m,$$

где q — *удельная теплота сгорания* данного топлива.

Упр. 1. Сколько тепла надо передать куску льда массой 100 г, взятого при температуре $t_1^{\circ} = -5^{\circ}\text{C}$, чтобы превратить его в пар при температуре $t_2^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}$?

Решение. Лед надо: а) нагреть от $t_1^{\circ} = -5^{\circ}\text{C}$ до 0°C ; б) расплавить; в) полученную воду нагреть от 0°C до 100°C ; г) выпарить; $Q = c_{\text{л}} m (t_{\text{пл}}^{\circ} - t_1^{\circ}) + \lambda m + c_{\text{в}} m (t_2^{\circ} - t_{\text{пл}}^{\circ}) + r m = m [c_{\text{л}} (t_{\text{пл}}^{\circ} - t_1^{\circ}) + \lambda + c_{\text{в}} (t_2^{\circ} - t_{\text{пл}}^{\circ}) + r]$.

$$Q = 0,1 (2,1 \cdot 10^3 \cdot 5 + 330 \cdot 10^3 + 4,2 \cdot 10^3 \cdot 100 + 2,3 \cdot 10^6) \approx \approx 305 \cdot 10^3 (\text{Дж}) = 305 \text{ кДж}.$$

Упр. 2. Для того чтобы узнать температуру пламени, в него поместили железную гирию, и, когда она прогрелась, ее перенесли в калориметр с холодной водой. Известны массы всех трех тел (гири, воды и калориметра), их удельные теплоемкости, температура воды (а стало быть, и калориметра) до начала опыта и температура t_0° , установившаяся в калориметре в конце опыта. Составьте уравнение с одним неизвестным, из которого можно найти первоначальную температуру t_1° гири.

Решение. Из закона сохранения энергии следует, что тепло, отданное гирей (Q_1), получила вода (Q_2) и калориметр (Q_3):

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

Каждый член в этом уравнении должен быть положительным. «Разворачивая» это уравнение, получаем:

$$c_1 m_1 (t_1^{\circ} - t_0^{\circ}) = c_2 m_2 (t_0^{\circ} - t_2^{\circ}) + c_3 m_3 (t_0^{\circ} - t_2^{\circ}).$$

Упр. 3. Каков к. п. д. спиртовки, если для того, чтобы лед массой m , взятый при 0°C , превратить в воду при температуре t_1° , пришлось сжечь M граммов спирта?

Ответ: $\eta = \frac{\lambda m + cm (t_1^{\circ} - t_2^{\circ})}{qM}$.

Упр. 4. В сосуде находилось $m_1 = 2,5$ кг льда и $m_2 = 1$ кг воды при температуре $t_1^{\circ} = t_2^{\circ} = 0^{\circ}\text{C}$. Сколько водяного пара ($m_3 = ?$) при температуре $t_3^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}$ надо впустить,

чтобы весь лед растаял, и в сосуде установилась $t_0^\circ = 10^\circ \text{C}$? Теплоемкостью сосуда пренебречь.

Решение. Тепло, отданное паром, получили лед и холодная вода: $gm_3 + c_2 m_3 (t_3^\circ - t_0^\circ) = \lambda m_1 + c_2 (m_1 + m_2) \times (t_0^\circ - t_2^\circ)$.

Ответ: $m_1 = 180 \text{ г}$.

Упр. 5. Капля воды упала с высоты h . На сколько градусов она нагрелась, если вся исчезнувшая механическая энергия перешла во внутреннюю энергию капли?

Решение. $mgh = cm\Delta t^\circ$.¹

Упр. 6. Пуля, сделанная из материала с удельной теплоемкостью c и летевшая со скоростью v , врезалась в стенку. На сколько градусов она нагрелась, если $\eta = 60\% = 0,6$ всей кинетической энергии пули пошло на увеличение ее внутренней энергии?

Решение. $\eta \cdot \frac{mv^2}{2} = cm\Delta t^\circ \rightarrow \Delta t^\circ = \frac{\eta v^2}{2c}$.

Упр. 7. Одинакова ли удельная теплоемкость газа при изотермическом (рис. 37а) и изобарическом (рис. 37б) нагревании?

§ 46. Расчет работы газа

1. Если газ расширяется, например, толкая поршень в цилиндре (рис. 38), то он совершает определенную положительную работу:

$$A = F\Delta l = pS\Delta l = p\Delta V$$

(мы считаем давление газа постоянным). Если газ сжимают, то работа газа будет отрицательной, так как направление движения поршня противоположно направлению силы, с которой газ давит на поршень.

2. Работу газа иногда рассчитывают с помощью диаграммы $p(V)$. Из рис. 39 видно, что если давление постоянно, то работа газа $A = p\Delta V$ численно равна площади под

¹ Здесь и в других подобных случаях выражение $cm\Delta t^\circ$ означает не количество полученного телом тепла, а прирост его внутренней энергии.

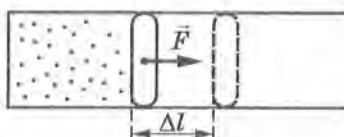


Рис. 38

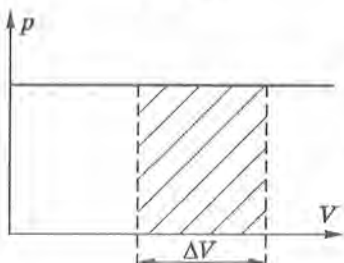


Рис. 39

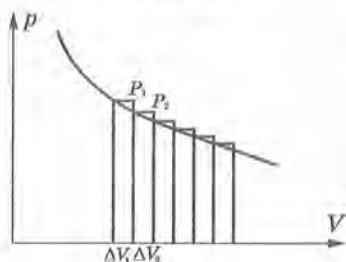


Рис. 40.

графиком. Если давление не было постоянным, т. е. график $p(V)$ является кривой линией, то для расчета работы можно разбить площадь под графиком на узкие столбики (рис. 40) и в пределах каждого столбика давление считать постоянным. Работа приближенно будет равна площади под ступенчатой фигурой:

$$A = p_1 \Delta V_1 + p_2 \Delta V_2 + \dots + p_N \Delta V_N.$$

Чем уже столбики, тем точнее будет выполняться это приближенное равенство и тем меньше площадь ступенчатой фигуры будет отличаться от площади под графиком. Если перейти к пределу (а точные определения и понятия «работа», «площадь под кривой линией» связаны с переходом к пределу), то окажется, что *работа газа в точности будет равна площади под графиком $p(V)$.*

3. Часто приходится иметь дело с круговым процессом (циклом), когда газ возвращается в исходное состояние (рис. 41). При расширении (участок ACB) газ совершает положительную работу, отдавая энергию внешним телам. При сжатии (участок BDA) внешние силы сжимают газ, передавая ему энергию. Работа самого газа будет на этом участке отрицательной. Полная работа газа A при круговом процессе равна алгебраической сумме этих

двух работ: $A = \text{площадь под } ACB + (- \text{ площадь под } BDA)$, т. е. равна площади внутри диаграммы.

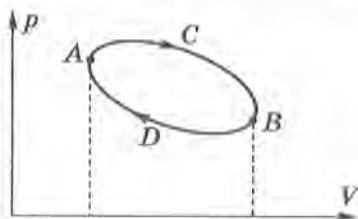


Рис. 41

Упр. 1. Какую работу совершил идеальный газ массой m , если при постоянном давлении p его температура повысилась от T_1 до T_2 ? Молярная масса газа равна M .

Решение. Напишем уравнение Клапейрона—Менделеева для первого и второго состояний:

$$pV_1 = \frac{m}{M}RT_1,$$

$$pV_2 = \frac{m}{M}RT_2.$$

Вычитая из второго уравнения первое, получаем:

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1).$$

Упр. 2. Какую работу совершил один моль идеального газа, когда при изобарическом расширении его температура повысилась на 1 К?

Ответ R .

§ 47. Адиабатный процесс

1. Адиабатным называют такой процесс, при котором газ (или другое вещество) теплоизолирован от внешней среды. Любой процесс, если он протекает достаточно быстро, практически можно считать адиабатным. Например, сжатие горючей смеси в цилиндре автомобильного двигателя длится меньше одной сотой доли секунды. За такое короткое время через стенки цилиндра не успевает проникнуть заметное количество тепла, поэтому этот процесс можно считать адиабатным.

2. При адиабатном сжатии газ нагревается, а при адиабатном расширении охлаждается. Объяснить это можно двумя способами:

а) при ударе молекул о неподвижный поршень они отскакивают с такой же скоростью, как ударились. Если же поршень, сжимая газ, движется навстречу молекулам, то они отскакивают с большей скоростью, чем налетели, как теннисный мяч, налетевший на движущуюся навстречу ракетку. Увеличение скорости движения молекул означает увеличение средней кинетической энергии беспорядочного движения, а стало быть, увеличение температуры. Если поршень двигался в обратную сторону, то молекулы отлетают от него с меньшей скоростью и температура понижается;

б) из закона сохранения энергии следует, что когда газ сжимают, то внешние тела, совершая положительную работу, теряют свою энергию. Значит, внутренняя энергия газа увеличивается. Но если газ идеальный, то его внутренняя энергия складывается только из кинетической энергии беспорядочного движения молекул. Увеличение этой энергии означает повышение температуры газа. Если газ расширяется, то, отодвигая поршень, он расходует внутреннюю энергию, следовательно, охлаждается. Если поршня нет, то все равно при расширении он охлаждается, так как, расширяясь, он отодвигает окружающий воздух, совершая определенную работу.

Очень нагляден такой опыт. Толстостенную колбу, имеющую сбоку трубку (рис. 42), плотно затыкают пробкой, затем велосипедным или другим насосом начинают накачивать в колбу воздух. Этот процесс происходит сравнительно медленно, поэтому температура воздуха в колбе повышается не очень значительно — она успевает выравниваться за счет теплообмена через стенки. При некотором достаточно большом давлении пробка вылетает из колбы и с силой ударяется о потолок. При этом в колбе становится бело от тумана. Туман возник потому, что при адиабатном расширении температура воздуха в колбе резко понизилась, и тот водяной пар, который в ней был, стал насыщенным.

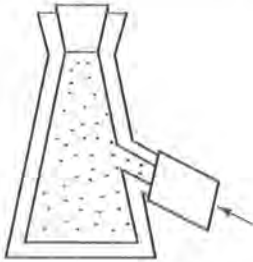


Рис. 42

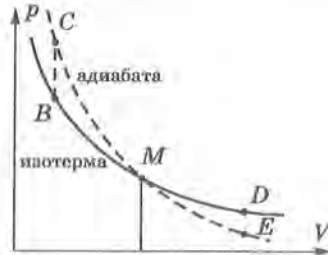


Рис. 43

3. Адиабатные процессы играют большую роль в атмосфере. Когда слой воздуха, прилегающие к земной поверхности, прогреваются, они перемещаются вверх. Поскольку вверху давление пониженное, воздух при таком перемещении расширяется. Это расширение можно считать адиабатным, так как воздух — очень плохой проводник тепла. При адиабатном расширении температура воздуха понижается. Этим и объясняется понижение температуры воздуха с увеличением высоты.

Нагревание воздуха при адиабатном сжатии приходится учитывать в компрессорах. В велосипедном насосе оно не мешает работе насоса, но в мощных компрессорах приходится применять искусственное охлаждение во избежание перегрева отдельных деталей и для уменьшения работы сжатия. В дизельных двигателях после всасывания очередной порции воздуха его так сильно сжимают, что температура повышается до нескольких сотен градусов (до 500–650 °С). Когда после этого постепенно впрыскивают топливо, оно самовоспламеняется и сгорает.

4. Адиабата всегда идет круче изотермы. В самом деле, пусть в начальный момент состояние газа на диаграмме $p(V)$ изображается точкой M (рис. 43). Если уменьшить объем изотермически, например, вдвое, то давление возрастет тоже вдвое (точка B на диаграмме). Если уменьшить объем адиабатно (тоже вдвое), то температура газа возрастет. Чтобы найти, как изменилось давление в этом случае, можно представить, что изменение объема и тем-

пературы происходило не одновременно, а по очереди: сначала уменьшили объем при постоянной температуре (точка *B*), а затем, не меняя объема, увеличили температуру. Ясно, что давление при этом повысится (точка *C*).

Если объем адиабатно увеличить (по сравнению с тем, каким он был в точке *M*), то температура понизится и давление станет меньше, чем при изотермическом расширении. Точка *E*, соответствующая адиабатному расширению, расположится ниже точки *D*.

Упр. 1. Идеальный газ расширяется в пустоту. Будет ли меняться его температура?

О т в е т: Не будет. Первое объяснение: молекулы газа не отскакивают от движущегося поршня или от слоев движущегося газа, поэтому средняя скорость хаотического движения молекул (а значит, и их средняя кинетическая энергия) не меняется. Другое объяснение: расширяясь в пустоту, газ не преодолевает никакого сопротивления, т. е. не совершает никакой работы. Поэтому внутренняя энергия газа не меняется.

Упр. 2. Если поршень, сжимающий газ, движется быстро, то каждая молекула, отскочившая от поршня, получает большую прибавку в скорости, чем при медленном движении поршня. Следует ли отсюда, что при медленном сжатии (если процесс по-прежнему адиабатный) газ нагреется до меньшей температуры, чем при быстром?

Упр. 3. Газ расширяют изотермически. Будет ли он при этом поглощать от внешней среды тепло или отдавать ей тепло, или не будет ни поглощать, ни отдавать?

У к а з а н и е. Сначала представьте себе, что газ расширялся адиабатно, и выясните, как будет меняться при этом его температура.

Упр. 4. В цилиндре дизельного двигателя воздух всасывается при температуре 27°C и сжимается в 12 раз до давления, в 32 раза превышающего нормальное давление. До какой температуры нагреется воздух в цилиндре?

О т в е т: 527°C .

§ 48. Применение первого начала термодинамики к различным процессам

Формула $Q = \Delta U + A$ иногда позволяет быстро, не вдаваясь в длительные рассуждения, давать ответы на вопросы, связанные с протеканием разных процессов. Приведем такие примеры:

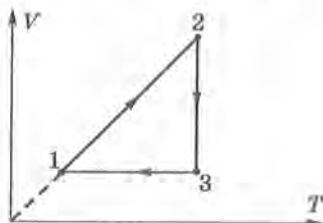


Рис. 44

а) выясним, как меняется температура при адиабатном расширении газа. Для адиабатного процесса $Q = 0$, следовательно, $\Delta U = -A$. Знак «минус» означает, что знак ΔU противоположен знаку A . При расширении газ совершает положительную работу, значит, ΔU отрицательно, а для идеального газа это означает, что уменьшилась кинетическая энергия его молекул, а стало быть, и температура;

б) выясним, получает или отдает газ тепло при изотермическом расширении. В этом случае $\Delta U = 0$, следовательно, $Q = A$. При расширении газ совершает положительную работу, значит, $Q > 0$. Если Q положительно, это означает, что газ получает тепло. Из формулы также видно, что все полученное газом тепло идет на совершение работы.

Упр. 1. Напишите первое начало термодинамики в применении к изохорному процессу.

Упр. 2. На рис. 44 в координатах $V(T)$ изображен круговой процесс (в форме прямоугольного треугольника), совершенный некоторой массой идеального газа. Заполните следующую таблицу (переписав ее предварительно в тетрадь).

В каждой клеточке таблицы проставьте один из следующих знаков: «+», «-», «0». Здесь A — работа, совершенная газом, Q — тепло, полученное газом (знак «+» означает, что газ получает тепло).

	1—2	2—3	3—1
A			
ΔU			
Q			

§ 49. Необратимость тепловых процессов

1. Все процессы в природе имеют определенную направленность. Например, если соприкоснуть горячее и холодное тела, то тепло само собой будет переходить от горячего тела к холодному. Первое начало термодинамики ничего не говорит о направленности процессов. Оно не запрещает теплу переходить от холодного тела к горячему, а только утверждает, что количество тепла, отданное при теплообмене одним телом, должно равняться количеству тепла, полученному другим телом. Таким образом, тот факт, что теплота не может сама собой переходить от холодного тела к горячему, представляет собой новый закон природы, никак не вытекающий из первого начала. Этот закон называют вторым началом термодинамики. Более строгая формулировка этого закона должна уточнить, что значит «само собой». Когда тепло переходит от горячего тела к холодному, в других телах может не происходить никаких изменений. Не то будет при обратном переходе. Можно осуществить такой процесс, при котором тепло будет отниматься от холодного тела и передаваться нагретому. Такой процесс осуществляется в бытовых холодильниках (он описан в § 24). Но для его осуществления необходима затрата энергии посторонних тел, т. е. в этих телах будут происходить какие-то изменения. Таким образом, *невозможен такой процесс, единственным результатом которого была бы передача тепла от менее нагретого тела к более нагретому* (второе начало термодинамики в формулировке Клаузиуса¹).

2. Если сам собой, без изменений в других телах, может протекать только прямой процесс, то *такой процесс называется необратимым*. Необратимым процессом является переход тепла от нагретого тела к холодному, а также нагревание тел посредством трения. Обратимым является любое механическое движение, если отсутству-

¹ Клаузиус (1822–1888) — немецкий физик.

ют трение и сопротивление среды. Пусть, например, мы отвели в сторону маятник и отпустили. Если в самой нижней точке его остановить и толкнуть в обратную сторону с той же скоростью, какую он имел в этой точке, то он начнет подниматься и пройдет через каждую точку с той же скоростью, какую имел в ней при прямом движении (но теперь эти скорости направлены в обратную сторону). При всем этом процессе никаких изменений в других телах не происходит. Если мы заснимем на киноплёнку процесс качания маятника от крайней точки до средней и пустим плёнку «задом наперед», то никакой несуразности в видимом на экране процессе не обнаружим. Не то будет при киносъёмке необратимого процесса. Пусть, например, мы засняли прыгуна, бросившегося с вышки в воду. Чувствительный термометр показал бы, что вода в результате прыжка несколько нагрелась. Закону сохранения энергии не противоречил бы «обратный процесс», при котором вода охладилась бы до первоначальной температуры, и за счет полученной энергии прыгун вынырнул бы на первоначальную высоту. Если заснятую плёнку пустить задом наперед, все убедились бы в несуразности, фантастичности происходящих событий.

В обратимых процессах наблюдается симметрия между прошедшими событиями и будущими или, иначе, между прошедшим и будущим временем. В необратимых процессах этой симметрии нет.

3. Все реальные процессы, происходящие в природе, строго говоря, необратимы. Если маятник, о котором шла речь, толкнуть из нижней точки в обратном направлении (с той же скоростью, что он имел в этой точке), то из-за трения и сопротивления воздуха он не дойдет до первоначальной точки. Кроме того, воздух и гири маятника при «прямом движении» несколько нагрелись, а при обратном движении они не охладятся, а еще больше нагреются. Но в этом и многих других случаях степень необратимости может оказаться настолько незначительной, что процесс можно с достаточной точностью считать обратимым.

4. Самая характерная черта теплового движения — его беспорядочность. Именно эта черта делает тепловые процессы необратимыми. Природе свойственно переходить от более упорядоченных состояний к менее упорядоченным. Это относится не только к процессам, связанным с нагревом или охлаждением тел. Например, если соединить два сосуда, заполненных разными газами, то в процессе диффузии они перемешаются. Этот процесс необратим. Если соединить сосуд, заполненный газом, с сосудом, где создан вакуум, газ заполнит его. Этот процесс также необратим. *Во всех случаях, когда есть выбор между «более упорядоченным» и «менее упорядоченным» состоянием (т. е. беспорядком), природа предпочитает беспорядок.* Это относится к любой замкнутой системе. В отдельных частях достаточно большой системы может происходить переход от беспорядка к порядку, но он компенсируется переходом к еще большему беспорядку в других частях этой системы, так что общее «количество беспорядка» все же увеличивается.

§ 50. Принцип действия теплового двигателя

1. Любой тепловой двигатель, например, автомобильный, помимо совершения работы, участвует еще по меньшей мере в двух процессах: он получает тепло от топлива и отдает часть тепла окружающему воздуху. Ясно, что к. п. д. мог бы быть больше, если бы он никому не отдавал часть тепла, а все полученное тепло тратил бы на совершение работы. Чтобы выяснить, возможно ли это, рассмотрим самый простой по идее двигатель, состоящий из цилиндра с подвижным поршнем, в котором находится определенная масса газа. Если газ нагреть, он будет расширяться, совершая определенную работу, например, поднимая груз, лежащий на поршне. Выясним, при каких условиях такой двигатель может работать периодически, т. е. поднимая одну порцию груза за другой, причем каждую порцию груза после подъема убирают с поршня или заменяют более легкой.

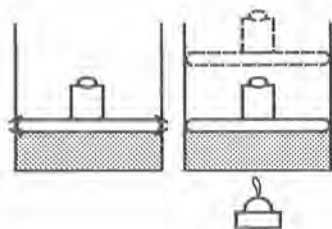


Рис. 45

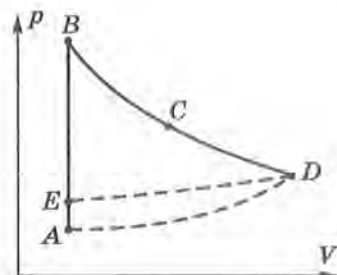


Рис. 46

Для упрощения рассуждений будем считать, что в цилиндре используется одна и та же порция газа. Пусть в начальный момент (когда поршень с грузом был внизу) газ был в равновесии (рис. 45). Чтобы газ начал расширяться, его надо нагреть, передав ему определенное количество тепла. Источником тепла является сгорающее топливо. Этот источник условно называют нагревателем. Нам удобно представлять, что, пока газ нагревали, поршень удерживали на месте (участок AB на рис. 46). Затем нагреватель убрали и дали газу возможность расширяться. Расширяясь (участок BCD), газ совершает определенную работу. Затем поршень надо вернуть в первоначальное положение. Для этого газ надо сжать (участок DE , или DA , или другая подобная кривая). При этом внешние силы совершат определенную положительную работу, а газ — отрицательную. Чтобы площадь внутри диаграммы была больше нуля, надо, чтобы работа сжатия была меньше работы расширения. Для этого надо, чтобы сжатие происходило при меньшей температуре, чем расширение. Чтобы понизить температуру газа, надо соприкоснуть его с телом, температура которого ниже температуры газа. Это тело называют охладителем. Роль охладителя обычно играет атмосферный воздух.

2. Из этих рассуждений следует два вывода: а) для работы теплового двигателя необходимо, чтобы во внешней

среде было два тела с разными температурами. Газ должен получать тепло при высокой температуре и отдавать тепло телу с более низкой температурой. Если разности температур нет, то двигатель периодически работать не будет (он сможет только один раз поднять груз);

б) если количество тепла, полученное от нагревателя, обозначить Q_H , а отданное охладителю — Q_{Ox} , то полезная работа (равная величине выработанной механической энергии) не может превышать величины $A = Q_H - Q_{Ox}$. Отсюда следует, что к. п. д. теплового двигателя (т. е. отношение полезной работы к количеству энергии, полученной двигателем от нагревателя) не может превышать величины

$$\eta = \frac{Q_H - Q_{Ox}}{Q_H}.$$

Таким образом, на к. п. д. тепловых двигателей наложено природой ограничение, которого нет у нетепловых двигателей. Например, гидравлическая турбина, получающая энергию от поднятой перед плотиной воды, в принципе «имеет право» всю полученную энергию использовать для совершения полезной работы. То же относится и к электродвигателю. У тепловых двигателей дело обстоит не так. Часть полученной от нагревателя энергии они обязаны отдать охладителю, стало быть, даже при отсутствии неизбежных потерь, в механическую энергию может быть превращена только часть полученной энергии. Ясно, что к. п. д. тепловых двигателей много ниже, чем у нетепловых (у лучших тепловых двигателей он составляет 40%, в то время как у гидротурбин и электродвигателей доходит до 95–98%).

3. Низкий к. п. д. тепловых двигателей — одно из проявлений необратимости тепловых процессов. Количество тепла, полученное от тел при их охлаждении, не может быть полностью использовано для получения механической работы. Обратное же превращение может быть осуществлено полностью. Например, при торможении поезда его кинетическая энергия полностью превращается во внутреннюю, связанную с нагревом поезда и окружающих тел.

4. В реальных двигателях, практически только в паровых турбинах, одна и та же порция рабочего вещества (пара) используется цикл за циклом, но полученные выводы сохраняют силу и для таких двигателей, где в каждом цикле используется новая порция рабочего вещества.

§ 51. Невозможность вечного двигателя второго рода

Если бы тепловой двигатель мог работать без охладителя, т. е. если бы он мог работать, только получая тепло от нагревателя, мы могли бы получить даровой двигатель. Источником тепла мог бы служить, например, океан. Расчет показывает, что если температуру океана понизить только на $0,01\text{ }^\circ\text{C}$, то отнятой энергии хватило бы, чтобы покрывать энергетические потребности всего мира на много тысячелетий (причем понижения температуры океана не произошло бы, так как убыль тепла была бы скомпенсирована солнечным излучением). Практически это было бы равносильно получению вечного двигателя. Его назвали вечным двигателем второго рода, чтобы отличать от вечного двигателя первого рода, который мог бы работать без затраты энергии.

Невозможность вечного двигателя второго рода и низкий к. п. д. тепловых двигателей — одно из проявлений необратимости тепловых процессов.

§ 52. Максимальный к. п. д. теплового двигателя

1. Формула $\eta = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{ох}}}{Q_{\text{н}}}$ не дает ответа на вопрос, какую

именно долю энергии надо отдавать охладителю, чтобы двигатель работал, — другими словами, какой к. п. д. может иметь тепловой двигатель. Ответ на этот вопрос дал французский ученый Сади Карно (1796–1832). Он дока-

зал, что к. п. д. теплового двигателя не может превышать величины

$$\eta = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{ох}}}{T_{\text{н}}} = 1 - \frac{T_{\text{ох}}}{T_{\text{н}}},$$

где $T_{\text{н}}$ — температура нагревателя, а $T_{\text{ох}}$ — охладителя. Из этой формулы видно, что для повышения к. п. д. надо повышать температуру нагревателя и уменьшать температуру охладителя. Что касается охладителя, то тут выбирать не приходится — пределом является температура окружающей среды — воздуха или воды ($T \approx 300 \text{ К}$)¹. Иначе дело обстоит с нагревателем. Рассмотрим для примера паровую турбину, которая приводит в движение электрические генераторы на тепловых и атомных электростанциях. Температуру пара стараются сделать как можно выше (теперь она достигает $540^\circ\text{С} = 813 \text{ К}$), но дальнейшее повышение температуры ограничено жаропрочностью стали и других сплавов, используемых для изготовления рабочих лопаток турбины.

2. Реальный к. п. д. тепловых двигателей заметно меньше, чем допускается формулой Карно. Во-первых, для достижения максимального к. п. д. форма кривых, образующих замкнутый цикл, должна быть строго определенной, но осуществить цикл Карно в реальных двигателях не удастся. Во-вторых, формула Карно относится к случаю, когда не учитываются потери энергии в реальных установках: неполное сгорание топлива, тепло, уносимое в атмосферу сгоревшими газами, потери на трение и т. д. Например, хотя предельный к. п. д. современных паровых турбин при указанных параметрах пара $\eta = \frac{813 - 300}{813} = 63\%$, фактически он не превышает 40%. Таким образом, для повышения к. п. д. тепловых двигателей надо не только повышать температуру нагревателя и понижать температуру охладителя, но и совершенствовать его рабочий цикл, уменьшать потери тепла и механической энергии.

¹ Для двигателей внутреннего сгорания за температуру охладителя надо принимать температуру отработавших газов.

§ 53. Основные типы тепловых двигателей

1. Из тепловых двигателей наибольшее распространение получили двигатели внутреннего сгорания (карбюраторные и дизельные), паровые турбины и реактивные двигатели. Основная часть двигателя внутреннего сгорания — цилиндр с поршнем и двумя клапанами, в котором сгорает горючая смесь (рис. 47). В большинстве двигателей каждый цикл состоит из 4-х тактов: впуск, сжатие, рабочий ход, выпуск. При этом в карбюраторном двигателе:

- а) всасывается горючая смесь (смесь паров бензина и воздуха);
- б) сжимается горючая смесь;
- в) горючая смесь воспламеняется от электрической искры, почти мгновенно сгорает, и происходит рабочий ход;
- г) сгоревшие газы выталкиваются из цилиндра.

В дизельном двигателе:

- а) всасывается чистый воздух;
- б) сжимается чистый воздух; степень сжатия здесь выше, чем в карбюраторном двигателе (14–19 вместо 5–9), поэтому температура возрастает значительней и становится выше точки воспламенения топлива;

в) постепенно впрыскивается распыленное топливо; по мере впрыскивания оно самовоспламеняется и сгорает;

- г) сгоревшие газы выталкиваются из цилиндра.

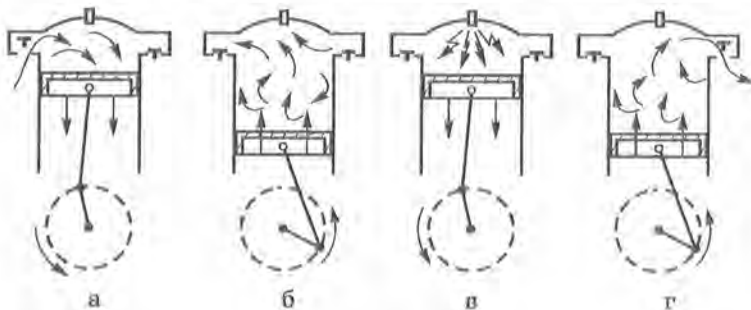


Рис. 47

Если двигатель одноцилиндровый, то для обеспечения равномерности хода надо ставить массивный маховик. На автомобилях часто применяют четырехцилиндровые двигатели. Вал у всех цилиндров общий. Когда в одном цилиндре происходит впуск, в другом происходит сжатие, в третьем — рабочий ход, в четвертом — выпуск. В этом случае можно обойтись сравнительно небольшим маховиком. Достоинства карбюраторных двигателей: они легче дизельных и легче запускаются. Но их к. п. д. (в среднем 25%) меньше, чем у дизельных (у которых средний к. п. д. 38%), к тому же дизельное топливо значительно дешевле бензина. Карбюраторные двигатели устанавливают на легковых автомашинах, легких грузовиках, мотоциклах, катерах, в винтовых самолетах и в некоторых вертолетах. Дизели устанавливают на тяжелых грузовиках, тракторах, танках, тепловозах, легких и средних судах (теплоходах).

2. Паровая турбина состоит из стального цилиндра, внутри которого находится вал с насаженными на нем стальными дисками. На ободке дисков укреплены стальные изогнутые лопатки (один такой диск с лопатками показан на рис. 48). Пар, поступающий из котла, направляется с помощью сопел (т. е. каналов) на лопатки и давит на них, заставляя вал вращаться.

Поскольку в турбине нет возвратно-поступательного движения, там нет деталей, которые надо сначала разогнать, потом тормозить, потом снова разогнать и т. д. Поэтому даже мощные турбины удается сделать компактными и очень надежными (построены паровые турбины мощностью свыше миллиона киловатт, тогда как для дизеля пределом является 40 000 кВт). Паровые турбины устанавливаются там, где требуются двигатели большой мощности: на тепловых и атомных электростанциях, а также на крупных судах.

3. Действие реактивных двигателей основано на том, что реактивная струя, вылетающая из двигателя, получает определенный добавочный импульс. Такой же импульс (но противоположного направления) получает дви-



Рис. 48

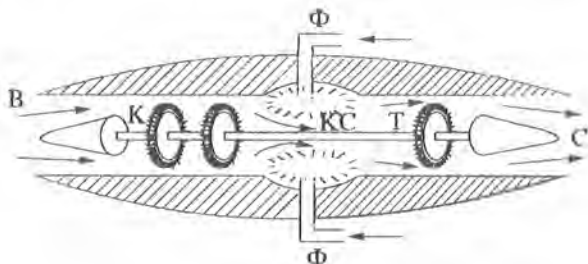


Рис. 49

гатель. Это следует из закона сохранения импульса. Реактивные двигатели делят на два класса: ракетные и воздушно-реактивные. Ракетные несут с собой не только топливо, но и окислитель. Воздушно-реактивные используют для горения топлива кислород атмосферы. Ракетные двигатели используются в ракетном оружии, а также для выведения в космос искусственных спутников и космических кораблей. Они используются также в некоторых типах военных самолетов (гиперзвуковых, т. е. таких, скорость которых более чем в 5 раз превышает скорость звука).

Воздушно-реактивные двигатели используются в авиации. Наибольшее распространение получил турбореактивный двигатель. Его схема приведена на рис. 49. Воздух, набегающий в полете на двигатель, через входное устройство В поступает в компрессор К. Из компрессора сжатый воздух поступает в камеру сгорания КС, куда через форсунки Ф (форсунка — устройство для распыления жидкого топлива) подается керосин. При запуске топливо воспламеняется электрической искрой, после чего горение поддерживается само собой. Сгоревший газ через выходное сопло С выбрасывается в атмосферу, а по пути приводит в действие газовую турбину Т (которая приводит в действие компрессор). Турбореактивный двигатель

в тысячу раз легче карбюраторного той же мощности. Эта его особенность, а также возможность летать на высотах, недоступных для винтовых самолетов, позволяет реактивным самолетам достигать огромной скорости и дальности полетов.

§ 54. Тепловые двигатели и охрана природы

1. При сжигании угля и нефти (и продуктов переработки нефти) в атмосферу выбрасываются вредные соединения: сернистые соединения (при сжигании угля), окислы азота, угарный газ и т. д. Особенно велико загрязнение атмосферы в крупных городах, где главными источниками загрязнения являются выхлопные газы автомашин. В России (и в ряде других стран) установлены предельные нормы, ограничивающие концентрацию вредных выбросов. К сожалению, при выработке этих норм приходилось учитывать не столько требования гигиены, сколько технические возможности современных автомобилей. Хотя ведутся работы по улучшению конструкции двигателей, которые позволили бы уменьшить выброс вредных веществ без заметного удорожания машины, радикального решения проблемы они не принесут. Радикальным решением был бы переход на электромобили или на топливо, не дающее вредных выбросов, например, водород, но в ближайшее время такой переход не предвидится.

Заметно загрязняют атмосферу электростанции, особенно угольные. На крупных электростанциях устанавливают фильтры, резко уменьшающие выброс вредных веществ. Но количество газов, выбрасываемых крупной станцией, так велико (до 1 миллиона $\text{м}^3/\text{час}$), что даже при высокой степени очистки загрязнение атмосферы остается значительным.

2. Бурный рост производства энергии, наблюдающийся в настоящее время, создает в далекой перспективе еще одну опасность: изменение сбалансированного круговорота газов в атмосфере и перегрев Земли. Известно, что

углекислый газ, выделяемый при дыхании животными (и образующийся при разложении органических веществ), поглощается растениями. За счет энергии Солнца в растениях происходят химические реакции (фотосинтез), в результате которых они выделяют в атмосферу кислород (а также создают органические вещества, необходимые для питания остальных живых организмов). В результате такого круговорота уже много миллионов лет доля кислорода в атмосфере (20,95%) и доля углекислого газа (0,029%) сохранялась неизменной. В настоящее время при сжигании топлива расходуется заметная доля (23%) кислорода, выделяемого при фотосинтезе. В результате количество кислорода в атмосфере стало уменьшаться (на 10 млрд. тонн ежегодно), а углекислого газа — увеличиваться (на 15 млрд. тонн). Масса атмосферы настолько велика ($5 \cdot 10^{15}$ тонн), что даже через несколько сотен лет доля кислорода упала бы менее чем на 1%, но увеличение доли углекислого газа должно привести к «парниковому эффекту». Суть его в том, что слой воздуха, обогащенный углекислым газом, хорошо пропускает солнечное излучение и в то же время задерживает тепловое излучение Земли. Если еще учесть тепло, выделяемое при производстве энергии¹, то все это вместе взятое может привести к заметному повышению температуры (примерно на 1°C) к середине нынешнего столетия. Это создаст угрозу таяния ледников и катастрофического повышения уровня Мирового Океана.

¹ В 1980 г. во всем мире сожжено 9 млрд. тонн условного топлива (т. е. топлива с удельной теплотой сгорания 29,3 МДж/кг; это эквивалентно теплотворной способности 1 кг каменного угля, 0,7 кг нефти, 0,8 м³ газа). В результате в атмосферу поступило $1,7 \cdot 10^{11}$ МДж тепла. Считают, что необратимые последствия «теплового загрязнения» наступят при стократном увеличении количества тепла, поступающего в атмосферу. Для сравнения укажем, что Солнце каждую секунду направляет на Землю $1,7 \cdot 10^{11}$ МДж энергии, из которых половина, проходя через атмосферу, достигает поверхности Земли.

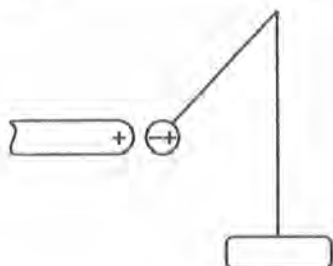


Рис. 51

рительно о мех, то шарики будут отталкиваться друг от друга. Если же шарики зарядить от эбонита, натертого о шелк, они тоже будут отталкиваться друг от друга. Но шарик, заряженный от стекла, притягивается к шарiku, заряженному от эбонита, так что им приписывают разные знаки. Заряду

стекла приписывают положительный знак, а эбонита — отрицательный¹. Любые другие заряды по своим свойствам совпадают либо с теми, что возникают на стекле, либо с теми, что возникают на эбоните.

4. Незаряженное тело всегда притягивается к заряженному. Объясняется это тем, что в любом незаряженном теле всегда есть положительные и отрицательные заряды. Обычно они перемешаны равномерно, так что их действие на другие тела никак не проявляется. Но если к незаряженному шарiku поднести заряженную палочку, то заряды в шарике начнут перемещаться (подробности этих процессов будут разобраны дальше в § 69 и 80). На ближайшем к палочке конце выступит заряд противоположного знака (рис. 51), а на дальнем — одноименный. Близкий к палочке заряд притягивается к ней, а дальний — отталкивается. Преобладать всегда будет притяжение, так как заряд противоположного знака расположен ближе, чем одноименный.

Упр. 1. Заряженная положительно палочка притягивает шарик. Что определенное можно сказать о заряде шарика?

О т в е т: Шарик либо не был заряжен, либо был заряжен отрицательно.

¹ Разумеется, можно было условиться и иначе: заряду стекла приписать отрицательный знак, а эбонита — положительный. Выбор знака тут совершенно условен.

§ 57. Электроскоп

Чтобы узнать, заряжено ли данное тело или нет, можно пользоваться специальным прибором — электроскопом.

Простейший электроскоп состоит из двух легких металлических листочков, укрепленных на металлическом стержне (рис. 52). Все это вставляется в стеклянный сосуд, чтобы предохранить листочки от случайных колебаний воздуха. Если заряженным телом коснуться стержня, то часть заряда перейдет на стержень, а от него к листочкам. Листочки зарядятся одноименно и, отталкиваясь друг от друга, разойдутся на определенный угол.

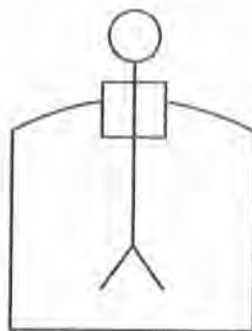


Рис. 52

§ 58. Проводники и изоляторы

1. В одних телах заряды остаются в том месте, где они возникли при электризации, в других же телах они растекаются по всем направлениям. Первые тела называют *изоляторами* или *диэлектриками*, вторые — *проводниками*.

Существование проводников и изоляторов можно установить таким опытом. Соединим два электроскопа медной проволокой и коснемся заряженной палочкой первого электроскопа (рис. 53а). Мы увидим, что листочки второго электроскопа также разойдутся. Теперь повторим этот опыт, соединив электроскопы не медной проволокой, а шелковым шнурком (рис. 53б). Мы увидим, что зарядится только первый электроскоп. Таким образом, в случае медного провода заряд, появившийся на одном конце, стал растекаться по проводу и достиг другого конца. В случае же шелкового шнурка заряд остался на том конце, где он возник. Следовательно, медь является проводником, а шелк — изолятором.



Рис. 53

2. Проводниками являются все металлы, растворы кислот и щелочей. Изоляторами являются все газы (в обычных условиях), шелк, фарфор, резина, эбонит, стекло, слюда и т. д.

§ 59. Распределение зарядов на проводниках

Опыты показывают, что в заряженных проводниках заряды располагаются не по всему объему, а только на внешней поверхности. Если, например, зарядить полый проводник (рис. 54) и небольшим металлическим шариком, укрепленным на изолирующей ручке, коснуться внутренней поверхности проводника, то шарик не зарядится. Если же коснуться шариком наружной поверхности, то он зарядится.

§ 60. Закон Кулона

1. Количественные расчеты электрических явлений стали возможны после опытов французского физика Кулона (конец XVIII века). Кулон изобрел чувствительный

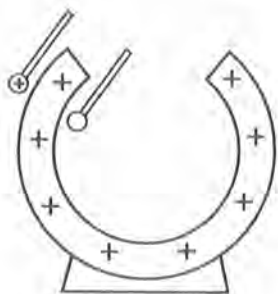


Рис. 54

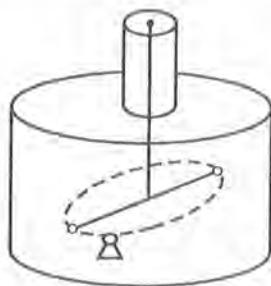


Рис. 55

прибор, с помощью которого он сумел точно измерять ничтожные силы. Основной частью такого прибора (названного крутильными весами) является металлическая нить, к которой подвешено коромысло из изолятора (рис. 55). На одном конце коромысла помещался заряженный шарик, на другом — противовес. Шарик, подвешенный на коромысле, взаимодействовал с другим, неподвижным шариком. О силе взаимодействия можно судить по углу закручивания нити.

Вначале Кулон выяснил, как зависит сила взаимодействия двух данных зарядов от расстояния между ними. Оказалось, что, если расстояние удвоить, сила уменьшится в 4 раза, если утроить — в 9 раз и т. д. Затем он исследовал, как зависит эта сила от величины зарядов. Но сначала надо было придумать способ, позволяющий сравнивать величины разных зарядов. Кулон поступил так. Он изготовил несколько одинаковых металлических шариков и зарядил один из них. Если ему надо было вдвое уменьшить заряд, он соприкасал заряженный шарик с незаряженным. Поскольку оба шарика одинаковы, Кулон считал, что заряд должен поделиться между ними поровну. Повторяя эту операцию несколько раз, можно было дробить первоначальный заряд на еще более мелкие порции. Замещая на крутильных весах один из зарядов другим, более мелким, Кулон установил, что при уменьшении од-

ного из зарядов в несколько раз во столько же раз уменьшается сила взаимодействия между зарядами.

Результаты этих наблюдений и измерений привели к следующему выводу: сила, с которой действуют друг на друга два точечных заряда, всегда направлена вдоль линии, соединяющей эти заряды. Величина силы прямо пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F \sim \frac{qq^{(1)}}{R^2} \text{ (знак } \sim \text{ означает «пропорционально»)}.$$

Если одна величина пропорциональна другой, это еще не значит, что между ними можно ставить знак равенства (например, из того факта, что стоимость молока пропорциональна его объему, вовсе не следует, что сколько литров куплено, столько рублей уплачено). Чтобы записать закон Кулона в виде равенства, надо ввести коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от выбранной единицы заряда:

$$F = k \cdot \frac{qq^{(1)}}{R^2}. \quad (1)$$

Единицей заряда в СИ является кулон (Кл). Кулон — это такой заряд, который действует на равный заряд, помещенный в вакууме на расстоянии 1 м, с силой $9 \cdot 10^9$ ньютонов¹. Из этого определения следует, что коэффициент пропорциональности равен $9 \cdot 10^9$:

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{qq^{(1)}}{R^2}.$$

В самом деле, если оба заряда равны 1 Кл, а $R = 1$ м, то расчет по этой формуле дает $F = 9 \cdot 10^9$ Н. Если один из зарядов увеличить, например, втрое, то и сила станет втрое больше, так что коэффициент $9 \cdot 10^9$ сохранится при любой величине зарядов.

¹ Тот факт, что невозможно получить точечный заряд столь большой величины (1 Кл), не делает данное нами определение кулона бессмысленным: при измерениях мы могли бы взять заряды в миллион или в миллиард раз меньше кулона и затем пересчитать результат.

По причинам исторического характера коэффициент пропорциональности выражают в виде дроби $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ ед. СИ.} \quad (2)$$

Величину ϵ_0 называют электрической постоянной. Ее определением является предыдущая формула. Из нее следует, что $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) = 8,9 \cdot 10^{-12}$ ед. СИ.

2. Приведенная формула справедлива только для случая, когда заряды находятся в вакууме. Если заряды находятся в воздухе, то сила взаимодействия едва заметно уменьшается (менее чем на 0,1%), так что практически эта формула и все те, которые будут выведены из нее дальше, применимы и в воздухе.

3. Формула Кулона применима только для точечных зарядов, т. е. для заряженных тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними. Если тела не являются точечными, каждое из них надо мысленно разбить на ряд мелких частей так, чтобы каждую часть можно было считать точечной, и к каждой паре частиц применить закон Кулона. Чтобы найти силу, действующую на все тело, надо потом все силы, приложенные к отдельным частям данного тела, просуммировать (не забывая, что силы — это векторы, поэтому речь тут идет о векторном суммировании).

4. При решении задач надо учесть следующее. Формула Кулона дает нам значение модуля силы, а не ее знак. Знак «+» или «-» появляется тогда, когда мы проектируем эту силу на ось координат, и зависит от того, совпадает ли направление оси с направлением силы или не совпадает. Поэтому при вычислении силы по формуле Кулона в формулу всегда подставляют абсолютные значения зарядов.

Упр. 1. В некоторой вымышленной стране единица заряда в СИ выбрана так, что коэффициент пропорциональности в законе Кулона равен единице. Этой единице заряда присвоили название «ку-ку». Дайте определение, что такое «ку-ку».

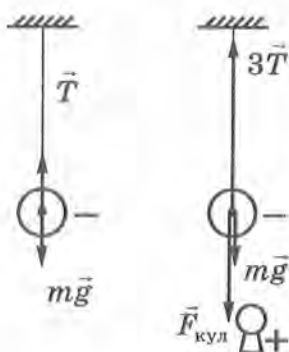


Рис. 56

Упр. 2. Почему в формуле равномерного движения $S = vt$ коэффициент пропорциональности равен единице?

Каков был бы этот коэффициент, если бы за единицу скорости в СИ приняли «лошадиную скорость»: скорость скаковой лошади 12 м/с?

Упр. 3. Что больше: сила, с которой два заряда по 1 Кл взаимодействуют друг с другом с расстояния 1 км, или сила, с которой груз массой

900 кг, находящийся вблизи земной поверхности, притягивается к Земле?

Упр. 4. Каким образом Кулон мог бы получить заряд вдвое меньше первоначального? (Ответ дайте в виде рисунка.)

Упр. 5. Шарик массой 2 г, подвешенный на непроводящей нити, имеет отрицательный заряд 10^{-7} Кл. Снизу на расстоянии 6 см от него помещают второй шарик. Каким должен быть его заряд, чтобы натяжение нити увеличилось в 3 раза?

Указание. См. рис. 56.

Ответ: $1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл.

Упр. 6. Два одинаковых маленьких шарика подвешены в одной точке на одинаковых нитях длиной по 20 см. После

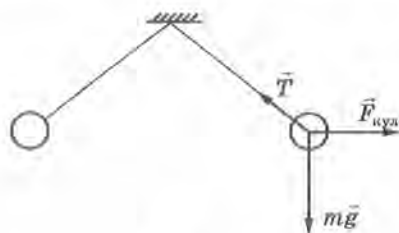


Рис. 57

того, как каждому шарiku сообщили заряд $4 \cdot 10^{-7}$ Кл, нити разошлись на угол 60° . Найти массу каждого шарика.

Указание. См. рис. 57.

Ответ: 6 г.

Упр. 7. В вершинах равностороннего треугольника, сторона которого равна 10 см, находятся одинаковые одноименные заряды по 10^{-8} Кл. Какая сила действует на каждый заряд?

О т в е т: $1,6 \cdot 10^{-1}$ Н.

§ 61. Закон сохранения заряда

1. Опыты показывают, что при электризации трением всегда заряжаются оба соприкасающихся тела, причем заряды этих тел равны по величине и противоположны по знаку. Например, если потереть друг о друга две пластинки, сделанные из разных материалов, и каждую из пластинок подносить поочередно к легкому заряженному телу, например, к легкому заряженному шарiku, подвешенному на шелковой нити (рис. 58), то к одной пластинке шарик будет притягиваться, а от другой отталкиваться. Если обе пластинки соединить вместе и поднести к тому же шарiku, то он останется на месте.

Эту закономерность легко объяснить, если предположить, что в любом незаряженном теле всегда присутствует равное количество положительных и отрицательных зарядов, перемешанных настолько тесно, что их присутствие никак не проявляется. При соприкосновении, согласно этой теории, заряды не создаются, а только пере-

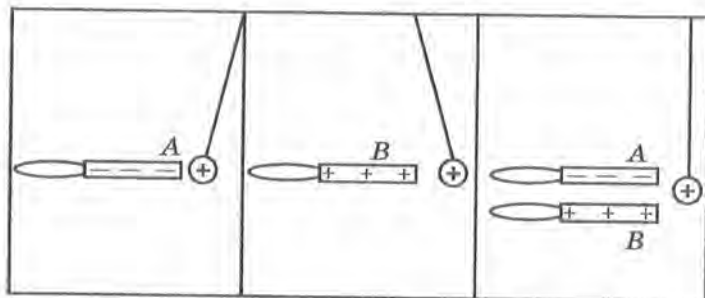


Рис. 58

ходят с одного тела на другое. Пусть, например, с одной пластинки на другую перешло 10 отрицательных зарядов. Ясно, что в результате зарядятся обе пластинки, причем их заряды будут равны по величине и противоположны по знаку.

2. Предположение о том, что заряды есть в мельчайшей порции любого вещества, выдвинутое еще в XVIII веке, впоследствии подтвердилось. Теперь мы знаем, что положительные и отрицательные заряды есть в каждом атоме. Подтвердился и закон сохранения заряда: *алгебраическая сумма зарядов, находящихся в любой области, не может измениться, если через границу области не прибывают или не уходят заряды*. Этот закон, как и закон сохранения энергии, является универсальным законом природы, соблюдающимся во всех известных в настоящее время процессах.

§ 62. Электрическое поле

1. Расчет силы, действующей на помещенный в данную точку заряд со стороны других зарядов, можно производить в два приема. Сначала найти величину

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^{(1)}}, \quad (3)$$

т. е. сначала найти, какая сила действовала бы в данной точке на единичный заряд $q^{(1)} = 1$ Кл. Эту величину называют *напряженностью поля*. Напряженность поля в данной точке не зависит от величины «пробного» заряда $q^{(1)}$. В самом деле, если бы мы удвоили этот заряд, то, согласно закону Кулона, удвоилась бы сила его взаимодействия с остальными зарядами, так что отношение $F/q^{(1)}$ не изменилось бы. Зная величину напряженности поля, можно рассчитать (по формуле $\vec{F} = q^{(1)}\vec{E}$), какая сила будет действовать на любой заряд, помещенный в эту точку.

Напряженность поля так же, как и сила, является вектором. За направление этого вектора условились считать

направление силы, действующей на положительный «пробный» заряд, помещенный в данную точку. Единицей напряженности в СИ является Н/Кл (ньютон на кулон).

2. Рассчитаем напряженность поля в точке, отстоящей на расстояние R от точечного заряда q . Для этого надо мысленно поместить в эту точку пробный заряд $q^{(1)}$, рассчитать по формуле Кулона силу, действующую на него ($F = k \frac{qq^{(1)}}{R^2}$), а затем поделить эту силу на величину «пробного» заряда. Проделав это, получим:

$$E = k \frac{q}{R^2}. \quad (4)$$

3. Первоначально понятие о напряженности поля было введено физиками для облегчения расчетов. Но развитие физики в XIX веке показало, что напряженность поля — это не только вспомогательное математическое понятие, облегчающее расчеты в сложных случаях. Оказалось, что напряженность поля характеризует нечто, реально существующее в каждой точке вокруг заряда. Таким образом, *электрическое поле — это реально существующий объект*. Реальность поля следует из таких фактов.

Поле обладает конечной скоростью распространения (она равна скорости света $c = 300\,000$ км/с). Это значит, что если заряженную частицу переместить, то созданное ею поле изменится не сразу (рис. 59). Например, в точке, удаленной от нового положения заряда на расстояние 3 м, новое значение поля установится через 1 пс (1 пикосекунда = 10^{-12} с), в точке, удаленной на 6 м, — через 2 пс и т. д. В обычных условиях это запаздывание незаметно. Но если скорость заряженной частицы

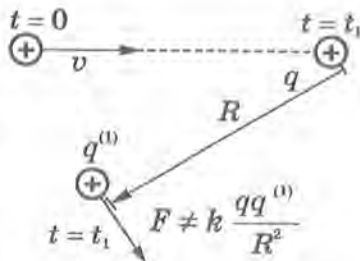


Рис. 59

сравнима со скоростью света, то уже нельзя считать, что сила, действующая со стороны этой частицы на данный заряд, определяется расстоянием между ними в данный момент (т. е. $F = k \frac{qq^{(1)}}{R^2}$). Сила, действующая на заряд, определяется напряженностью поля в данной точке ($F = q^{(1)} E$). Вычислить поле, существующее в этой точке в данный момент, не так просто, так как оно зависит от того, от какой из точек, где побывала заряженная частица, успело дойти поле к интересующей нас точке. Но важно то, что если поле в данной точке известно, то ничего больше не требуется знать, чтобы предсказать поведение заряда, помещенного в этой точке. Таким образом, *именно поле, а не заряженную частицу следует считать «источником силы», действующей на данный заряд*. А так как одним из важнейших свидетельств того, что данное тело существует реально, мы считаем тот факт, что тело является «источником сил» (например, если мы расшибли в темноте нос о стенку, то не сомневаемся в том, что эта стенка реально существует), то ясно, что мы должны признать, что и поле существует реально.

К этому можно еще добавить, что в каждой области, где есть поле, сосредоточена определенная энергия. В XX веке выяснилось, что каждая порция энергии обладает и определенной массой (а если поле переменное, то и импульсом). Эти качества мы также считаем признаками реального существования объекта. Таким образом, поле наряду с веществом является видом материи. Оно существует независимо от нашего сознания и может быть обнаружено по его воздействию на электрические заряды.

Упр. 1. Напряженность поля в точке M равна 20 000 Н/Кл. Что это значит? (Самый наглядный ответ таков: это значит, что если в точку M поместить «пробный» заряд в 1 Кл, то на него будет действовать сила в 20 000 Н. Однако в данном случае наглядность весьма относительна, поскольку сосредоточить в небольшом теле заряд в 1 Кл невозможно — отдельные части тела отталкивались бы друг от друга с силами в миллиарды килоньютонів).

Упр. 2. С каким ускорением движется шарик, масса которого m , а заряд q , если напряженность поля в точке, где он находится, равна E ? Никаких других сил, кроме электрических, на шарик не действует.

Упр. 3. Нет ли противоречия в том, что в одной из формул для расчета напряженности заряд находится в знаменателе, а в другой — в числителе (речь идет о формулах (3) и (4))?

Упр. 4. Начертите точечный положительный заряд и покажите на этом чертеже, куда направлен вектор напряженности в точке, расположенной: а) справа от заряда; б) слева; в) над ним; г) под ним?

Упр. 5. Имеется точечный заряд $4 \cdot 10^{-7}$ Кл. Рассчитайте напряженность поля на расстояниях 2 м от заряда, 4 м, 6 м, 8 м и 10 м. Данные сведите в таблицу и постройте по ним график зависимости $E(R)$. Масштаб по горизонтали 1 см — 1 м, по вертикали 1 см — 100 Н/Кл.

§ 63. Принцип суперпозиции

Опыт показывает, что сила взаимодействия двух данных зарядов не зависит от присутствия третьего заряда. Например, если заряд q_0 притягивался к q_1 с силой \vec{F}_1 , то эта сила не изменится при появлении еще одного заряда q_2 . Это верно даже в том случае, когда заряд q_2 помещен между «первоначальными» (рис. 60) так, что он заслоняет их друг от друга. Однако силу взаимодействия между ними он не может «заслонить» ни в малейшей мере. Просто к первоначальной силе \vec{F}_1 добавится сила \vec{F}_2 , вызванная присутствием добавочного заряда, так что результирующая сила $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

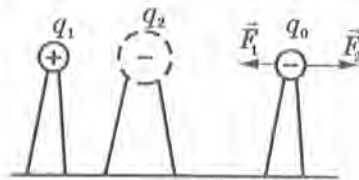


Рис. 60

Отсюда следует, что если поле создано двумя или несколькими зарядами, то результирующая напряженность

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^{(1)}} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2}{q^{(1)}} = \frac{\vec{F}_1}{q^{(1)}} + \frac{\vec{F}_2}{q^{(1)}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Таким образом, *результатирующее поле, созданное несколькими зарядами, равно векторной сумме тех полей, которые были бы созданы каждым из зарядов в отсутствие других*. Это утверждение называют принципом суперпозиции полей (по-русски «суперпозиция» означает «наложение»).

Упр. 1. На концах отрезка длиной 60 см размещены одинаковые по модулю точечные заряды по $2 \cdot 10^{-7}$ Кл. Какова напряженность поля в середине отрезка, если заряды: а) одноименные; б) разноименные?

О т в е т: а) 0; б) $4 \cdot 10^4$ Н/Кл.

Упр. 2. В двух наиболее удаленных друг от друга вершинах квадрата со стороной $a = 60$ см находятся положительные заряды по $4 \cdot 10^{-7}$ Кл. Найдите напряженность поля в двух других вершинах квадрата.

О т в е т: 14 000 Н/Кл.

Упр. 3. В двух вершинах равностороннего треугольника, сторона которого $a = 10$ см, расположены одинаковые по модулю заряды по 10^{-8} Кл. Какова напряженность поля в третьей вершине? Рассмотреть два случая: а) заряды разноименные; б) одноименные.

О т в е т: а) 9 000 Н/Кл; б) 15 600 Н/Кл.

Упр. 4. Металлическое кольцо радиуса R имеет заряд q . Чему равна напряженность поля в центре кольца?

Упр. 5. Начертите отрезок прямой $ABCD$, где $AB = BC = CD$. В точке A находится положительный заряд, а в точке C — равный ему по модулю отрицательный заряд. Где напряженность поля больше: в точке B или в точке D ?

Упр. 6. В точке A помещен положительный заряд, а в точке B — равный ему по модулю отрицательный заряд. Где напряженность поля больше: в точке C , расположен-

ной посередине отрезка AB , или в точке D , расположенной вне этого отрезка, но равноудаленной от A и B ?

Упр. 7. В вершинах равностороннего шестиугольника, сторона которого равна a , расположены три положительных заряда $+q$ и три отрицательных $-q$. Какова напряженность поля в центре шестиугольника? Рассмотреть все возможные случаи.

Ответ: 0 ; $k \frac{2q}{a^2}$; $k \frac{4q}{a^2}$.

Упр. 8. Палка длиной $2l$ сделана из изолятора. К концам палки прикреплены маленькие шарики, заряженные одноименными зарядами q . Чему равна напряженность поля, созданного зарядами шариков, в точке M , равноудаленной от обоих шариков, если расстояние ее от середины палки равно r ? Решив задачу в общем виде, рассмотрите три частных случая: а) $r=0$; б) $r \ll l$; в) $r \gg l$.

Ответ: $\vec{E} = k \frac{2qr}{(r^2 + l^2)^{3/2}}$; а) 0 ; б) $k \frac{2qr}{l^3}$; в) $k \frac{2q}{r^2}$.

Упр. 9. Как меняется напряженность поля (увеличивается или уменьшается) при удалении от середины заряженного тела, описанного в *упр. 8*? Не противоречит ли ответ закону Кулона?

§ 64. Поле — фундаментальное понятие

1. Начиная изучать физику чувствуют некоторую неудовлетворенность оттого, что им не дают определенных, раскрывающих «сущность» поля, не пытаются разъяснить, из чего поле состоит. Дело тут в том, что любые определения опираются в конечном счете на такие понятия, которые не поддаются дальнейшему расчленению (их можно назвать фундаментальными). Примерами таких понятий являются *пространство, время, вещество, заряд, поле*. С первыми тремя мы осваиваемся еще в детстве, не требуя, чтобы нам определили их «сущность». В ходе изучения курса электричества требуется

освоиться с новыми фундаментальными понятиями (с понятиями *заряда и поля*).

2. В XIX веке делались попытки уподобить поле некоторому веществу («электрической атмосфере заряда»), заполняющему все пространство между зарядами. Впоследствии выяснилась полная бесплодность таких попыток. Кроме того, свойства поля (например, суперпозиция полей) невозможно согласовать со свойствами какого бы то ни было, даже вымышленного, вещества. К тому же попытка «понять» свойства поля, рассматривая его как некое тело, приводит к «заколдованному кругу», так как, если мы хотим понять, как взаимодействуют два тела (например, гвоздь и молоток), мы должны свести это к взаимодействию их атомов. Но силы, действующие между атомами, имеют электромагнитную природу и осуществляются посредством соответствующих полей.

Надо свыкнуться с тем, что взаимодействие зарядов осуществляется посредством поля и что этот факт — фундаментальный, не поддающийся расчленению на какие-то более наглядные детали. Невозможность представить, на какие знакомые нам в повседневной жизни предметы походит электрическое поле, ничуть не мешает физикам досконально изучать свойства поля, подобно тому, как опытному шахматисту не мешает хорошо играть в шахматы тот факт, что он не знает, из чего сделаны шахматные фигуры.

§ 65. Силовые линии

1. Поле \vec{E} , существующее в данной точке, условно изображают вектором, выходящим из данной точки. Но как изобразить поле в целой области? Самое простое — выбрать достаточно большое количество точек и изобразить в определенном масштабе векторы напряженности в этих точках. Но полученная картина не получается наглядной. Чтобы сделать ее наглядной и избежать перекрещивания линий, поступают так. Выбирают какую-нибудь точку вблизи системы зарядов, и направление напряжен-

ности в ней изображают коротким отрезком. Следующую точку выбирают не наобум, а там, где кончился этот отрезок, и показывают направление напряженности в этой новой точке в виде отрезка, пририсованного к старому,

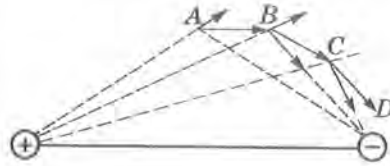


Рис. 61

и т. д. (рис. 61). Если выбрать несколько «начальных точек», то мы получим несколько ломаных линий. При уменьшении длины отрезков эти линии будут приближаться к плавным (а направление напряженности будет определяться направлением касательных к этим линиям). Такие линии называют линиями напряженности, или силовыми. Таким образом, *силовая линия* — это линия, проведенная так, что касательная к ней в каждой точке совпадает с направлением напряженности в этой точке.

Легко видеть, что силовыми линиями одиночного точечного заряда являются прямые, радиально расходящиеся от заряда (рис. 62 и 63). В самом деле, в любой точке вокруг одиночного заряда (например, в точке M) вектор напряженности направлен вдоль радиуса, а это и есть направле-

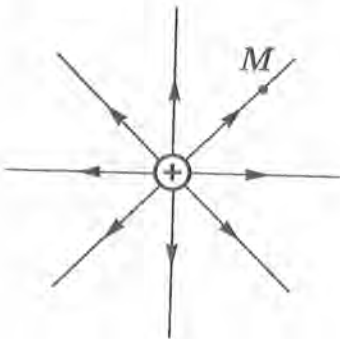


Рис. 62

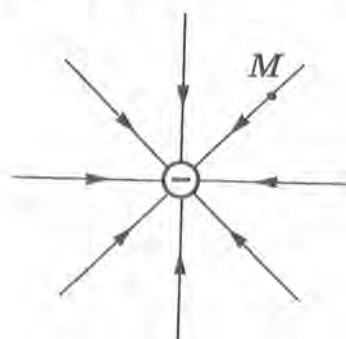


Рис. 63

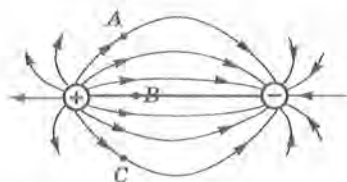


Рис. 64

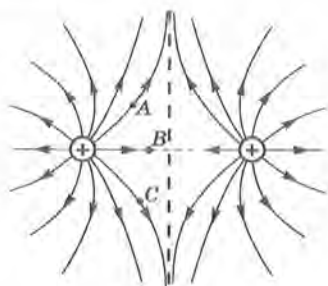


Рис. 65

ние касательной к силовой линии, проведенной через эту точку.

На рис. 64 изображена картина силовых линий между двумя равными разноименными, а на рис. 65 — между двумя равными одноименными зарядами. Правильность этих картин можно проверить, вычислив направление напряженности в выбранных для проверки точках и сравнив результат с нарисованной картиной (например, в точке A , как это ясно даже без расчета, вектор напряженности направлен вправо и вверх, в точке B он горизонтален, в точке C направлен вправо и вниз; именно так и проведена силовая линия в этих точках).

2. С помощью силовых линий можно изображать не только направление, но и величину напряженности. Для этого условились проводить *силовые линии гуще там, где напряженность поля больше*. Если это условие выполнить всюду вблизи заряда, то оно автоматически будет выполняться и в более далеких точках. Например, чтобы показать, что напряженность поля вокруг одиночного точечного заряда не зависит от направления, надо проводить силовые линии по всем направлениям одинаково густо (так и сделано на рис. 62 и 63). Если это выполнено вблизи заряда, то и для далеких точек «само собой» будет получаться так, что большей напряженности будет соответствовать большая густота силовых линий («само собой», без нашего вмешательства в чертеж). Так будет получаться и в более сложных случаях.

3. Форму и расположение силовых линий можно определять не только на основе теоретических соображений, но и опытным путем. Это оказалось возможным потому, что мелкие крупинки изолирующих веществ в сильном электрическом поле сцепляются друг с другом. При этом они, как показывает опыт, образуют цепочки, расположенные вдоль силовых линий. Эти цепочки можно наблюдать непосредственно или фотографировать (чтобы уменьшить трение, крупинки обычно помещают в ванну, заполненную маслом).

Упр. 1. Могут ли силовые линии пересекаться?

Ответ: Нет, это означало бы, что в точке пересечения есть два направления напряженности.

§ 66. Поле заряженной сферы и плоскости

1. Если требуется рассчитать поле, созданное большим заряженным телом, надо мысленно разбить его на множество мелких частей так, чтобы каждую часть можно было считать точечным телом (рис. 66). Рассчитав по формуле

$E_k = k \frac{\Delta q_k}{R_k^2}$ поле, созданное в интересующей нас точке каж-

дым отдельным точечным зарядом, надо все эти векторы затем просуммировать.

Мы приведем без вывода результаты расчетов для двух самых важных случаев.

Рассмотрим поле вокруг равномерно заряженной сферы. Ясно, что в каждой точке вне сферы вектор напряженности направлен по радиусу (рис. 67). В самом деле, проведем через точку M

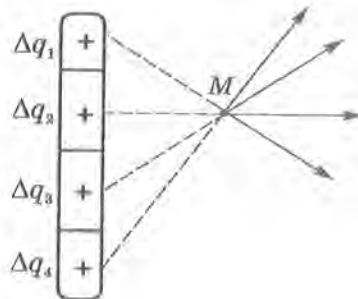


Рис. 66

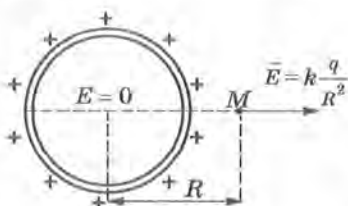


Рис. 67

плоскость, рассекающую сферу на две одинаковые части. Если вектор \vec{E} направлен не вдоль радиуса, а составляет с ним некоторый угол, отличный от нуля, это означает, что одна полусфера создает в точке M более сильное поле, чем другая. Но так как обе полусферы одинаковы, то этого не может быть. Таким образом, поле вокруг сферы имеет такой же вид, как вокруг точечного заряда. Это наводит на мысль, что формула точечного заряда $E = k \frac{q}{R^2}$ годна и для этого случая. Строгий расчет подтверждает, что это действительно так.

Внутри сферы поле отсутствует. Доказательство можно провести так же, как для случая гравитационного поля (рис. 68). Итак, *равномерно заряженная сфера внутри сферы поля не создает, а снаружи создает такое поле, как если бы весь ее заряд был сосредоточен в центре.*

2. Теперь рассмотрим поле, созданное заряженной проводящей плоскостью. Расчет затрудняется двумя обстоятельствами. Во-первых, заряд на ней распределен неравномерно (у краев он, видимо, «плотней», чем в середине).

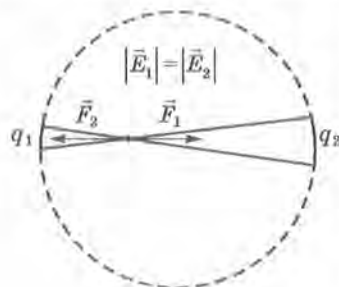


Рис. 68

Во-вторых, если бы даже заряд был распределен равномерно, поле против разных участков было бы различным. Чтобы облегчить расчет, представим, что пластина стала бесконечной (но осталась тонкой). Тогда поверхностная плотность заряда (т. е. величина заряда, приходящаяся на единицу

площади $\sigma = \frac{q}{S}$) всюду станет

одинаковой, так как ни один участок не может претендовать на то, что он ближе к середине, чем остальные. По той же причине поле во всех точках, равноотстоящих от пластины (например, в точках A и B на рис. 69), будет одинаковым. Кроме того, поле в любой точке будет перпендикулярно к пластине.

Если допустить, что это не так, например, что вектор \vec{E} образует с нормалью некоторый угол, отличный от нуля (точка M на том же рисунке), это означало бы, что нижняя полуплоскость создает в этой точке более сильное поле, чем верхняя. Но так как нельзя считать, что верхняя полуплоскость короче нижней, то этого не может быть.

Итак, силовые линии бесконечной равномерно заряженной плоскости — это прямые линии, перпендикулярные к плоскости. Чертить их всюду надо одинаково густо, так как поле во всех равноотстоящих точках одинаковое. Эта картина наводит на мысль, что не только в равноотстоящих, а во всех без исключения точках напряженность поля одинакова. Расчет показал, что это действительно так: *поле равномерно заряженной бесконечной плоскости однородно* (т. е. вектор \vec{E} во всех точках одинаков) и равно

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

где $\sigma = \frac{q}{S}$ — поверхностная плотность заряда.

Какое отношение имеют эти результаты к реальным телам? Можно предположить, что если рассматривать поле в непосредственной близости от пластины (на рас-

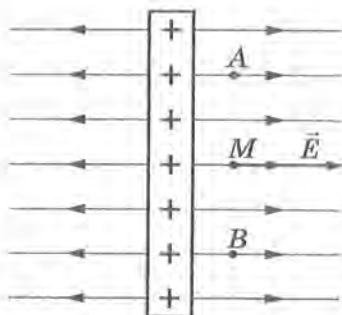


Рис. 69

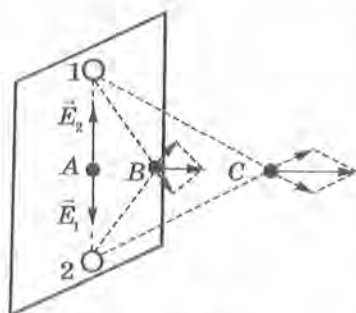


Рис. 70

стояниях, в десятки раз меньших, чем размеры пластин) и достаточно далеко от ее краев, то поле там будет такое же, как у бесконечной пластины. Опыт подтверждает это предположение.

3. Выясним, не противоречит ли закону Кулона тот факт, что при удалении от бесконечной плоскости поле не убывает.

Рассмотрим для этого несколько точек, расположенных на одной нормали на разных расстояниях от пластины, и выясним, какое поле создается в этих точках далекими от них участками 1 и 2 (рис. 70). В точке A результирующее поле, созданное этими симметричными участками, равно нулю. В точке B векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 меньше по модулю, чем в точке A , но угол между ними стал более «выгодным», так что результирующее поле будет отлично от нуля. В точке C угол между ними стал еще «более выгодным», и это с лихвой компенсирует некоторое уменьшение каждой из составляющих. Расчет (см., например, *упр. 6* к § 63) подтверждает, что при удалении от далеких участков поле растет (пока $r \ll l$). С другой стороны, поле, созданное в этих же точках «середиными» участками, убывает с расстоянием. Неудивительно, что результирующее поле оказалось постоянным.

4. *Две большие плоские пластины, разделенные диэлектриком и заряженные разноименно, называют плоским конденсатором.* Пластины считаются большими, если их размеры во много раз больше расстояния между ними. Из предыдущего следует, что внутри конденсатора поле однородно (оно равно сумме полей каждой из пластин). Возле краев однородность нарушается. Отступ-

ление от однородности в участках, близких к краям, называют краевым эффектом. Форма силовых линий в конденсаторе показана на рис. 71. Вне конденсатора поле практически отсутствует (если не учитывать краевого эффекта).



Рис. 71

Упр. 1. Постройте график, выражающий зависимость напряженности поля заряженной металлической сферы от расстояния до центра сферы.

Упр. 2. Имеются две концентрически расположенные металлические сферы. Радиус внутренней сферы 5 см, а наружной 15 см. Заряд внутренней сферы положительный и равен 10^{-8} Кл, заряд внешней сферы отрицательный и тоже равен 10^{-8} Кл. Какова напряженность поля в точках, удаленных от центра сфер на 1 см? 10 см? 20 см?
О т в е т: 0; 9 000 Н/Кл; 0.

Упр. 3. Две близко расположенные пластины заряжены разноименными зарядами $+q$ и $-q$, образуя плоский конденсатор. Какова напряженность поля в пространстве между пластинами и снаружи? Площадь каждой пластины равна S .

Упр. 4. Изменяются ли ответы к упр. 3, если расстояние между пластинами вдвое уменьшить?

Упр. 5. Имеются 3 параллельные бесконечные пластины. Первая и вторая заряжены положительно, третья отрицательно. Каждая пластина в отсутствие других создавала бы напряженность E . Какова напряженность: а) вне пластин; б) между 1-й и 2-й пластинами; в) между 2-й и 3-й?

О т в е т: а) E ; б) E ; в) $3E$.

Упр. 6. В однородном электрическом поле расположенного горизонтально плоского конденсатора находится пылинка массой $8 \cdot 10^{-7}$ г, обладающая отрицательным за-

рядом $1,6 \cdot 10^{-15}$ Кл. Какой должна быть по величине и направлению напряженность поля, чтобы пылинка была в равновесии?

О т в е т: $E = \frac{mg}{q} = 5 \cdot 10^6$ Н/Кл, поле направлено вниз.

Упр. 7. Шарик массой 0,5 г, заряд которого 10^{-8} Кл, подвешен на шелковой нити. На какой угол от вертикали отклонится нить, если создать однородное поле 10^5 Н/Кл, направленное горизонтально?

О т в е т: $\operatorname{tg} \alpha = 0,2$.

§ 67. Опыт Иоффе—Милликена

Электрические заряды, как и вещество, нельзя делить без конца на все более мелкие порции. Существует мельчайшая порция электрического заряда, называемая *элементарным зарядом*: $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. О существовании элементарного заряда догадались еще в конце XIX века, но прямое доказательство его существования было дано только в XX веке американским физиком Р. Милликеном и русским физиком А. Ф. Иоффе. В обоих случаях опыты проводились в однородном поле, созданном с помощью плоского конденсатора. В опыте Иоффе (1913) в это поле помещались мельчайшие цинковые пылинки, на которые направлялись ультрафиолетовые лучи (так называются невидимые лучи, которые наряду с видимым светом излучает Солнце; эти лучи могут также излучать специальные лампы). Ультрафиолетовые лучи способны выбивать из цинка (и многих других веществ) электроны. Электрон, как мы теперь знаем, является частицей, несущей на себе отрицательный элементарный заряд, который невозможно с него «соскрести».

Когда цинковая пылинка не облучалась, она падала под действием силы тяжести. Если облучить ее так, чтобы она потеряла один электрон, то она зарядится положи-

тельно и ее заряд будет равен $+q_1$. Заряженную пылинку (рис. 72) можно удержать в покое, если зарядить конденсатор так, чтобы электрическая сила, действующая на пылинку, уравновесила силу тяжести:

$$mg = q_1 E_1.$$

Масса пылинки при потере электрона практически не меняется, так как масса электрона во много миллиардов раз меньше массы пылинки. Если в другой раз пылинка под действием излучения теряет два электрона, то, чтобы удержать ее в равновесии, надо создать другое поле E_2 при котором

$$mg = q_2 E_2.$$

Если пылинка теряет 3 электрона, то надо создать поле E_3 и т. д. Измеряя $E_1, E_2, E_3 \dots$, Иоффе установил, что заряд цинковой пылинки (q_1, q_2, q_3) мог меняться только скачком: он равнялся либо q_0 , либо $2q_0$, либо $3q_0$ и т. д. Этот факт можно было объяснить только тем, что не существует порции заряда меньше, чем q_0 . Величина q_0 получилась очень близкой к тому значению, которое приписывается ему теперь.

Р. Милликен получал с помощью пульверизатора мелкие капельки масла. Двигаясь в воздухе, они заряжались частично вследствие трения о воздух, частично потому, что к ним прилипали ионы из окружающего воздуха. Затем капли поступали в плоский конденсатор и уравнивались электрической силой поля конденсатора. Милликен проводил свои опыты 10 лет (с 1906 по 1916 г.), непрерывно совершенствуя методику измерений. Его опыты окончательно убедили физиков, что величина $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — это не среднестатистическое значение мельчайших зарядов

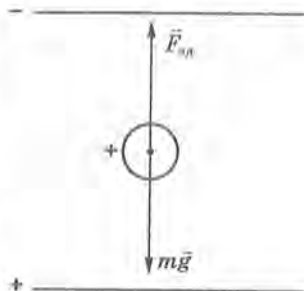


Рис. 72

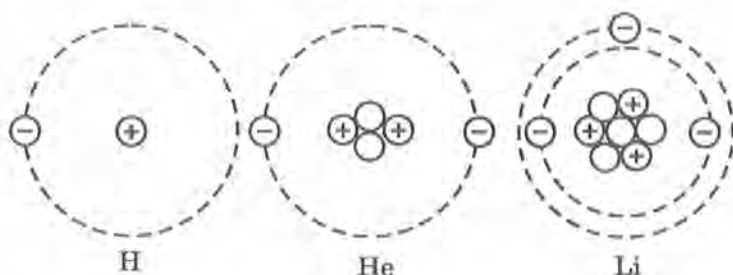


Рис. 73

(вроде средней скорости молекул), а вполне определенный, одинаковый для всех электронов заряд.

§ 68. Строение атома (повторение)

1. Атом любого элемента состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома (свыше 99,9%), и из электронной оболочки. Ядро построено из протонов и нейтронов. Массы этих частиц почти совпадают (протон в 1836, а нейтрон в 1839 раз тяжелее электрона), но протон является положительно заряженной частицей, а нейтрон — нейтральной. Заряд протона равен по абсолютной величине заряду электрона и является наименьшим электрическим зарядом:

$$q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Любой электрический заряд кратен этой величине (т. е. больше элементарного заряда в целое число раз). Масса электрона

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Атомный номер элемента в таблице Менделеева равен числу протонов в ядре. Первым в таблице Менделеева сто-

ит водород. Его ядро состоит из одного протона. Вторым стоит гелий. Его ядро содержит два протона и два нейтрона. Третьим стоит литий. Его ядро содержит три протона и 4 нейтрона и т. д. Упрощенные модели этих атомов изображены на рис. 73.



Рис. 74

2. Число электронов в электронной оболочке равно числу протонов в ядре, так что «нормальный» атом любого элемента является нейтральным. От нейтрального атома можно оторвать один или несколько электронов или же, наоборот, присоединить к нему «лишние» электроны. Такой заряженный атом называют *ионом*. Если от атома отрывают электроны, возникает положительный ион, если присоединяют — отрицательный ион. Условно ионы можно изображать так, как показано на рис. 74.

Упр. 1. На сколько граммов увеличилась бы масса тела, если бы удалось добавить ему электроны общим зарядом 1 Кл?

О т в е т: $5,7 \cdot 10^{-9}$ г.

Упр. 2. Согласно упрощенной модели, атом водорода состоит из протона, вокруг которого по окружности вращается электрон. Во сколько раз кулоновы силы, действующие между протоном и электроном, больше гравитационных сил, действующих между этими же частицами?

Гравитационная постоянная $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2}$ (остальные данные можно найти в тексте этого параграфа).

Упр. 3. Рассчитайте кинетическую энергию электрона в атоме водорода, считая известными радиус R орбиты, заряд электрона $(-q_0)$ и заряд ядра $(+q_0)$.

О т в е т: $k \frac{q_0}{2R}$

§ 69. Электронный характер проводимости металлов

1. В начале XX века была разработана теория, объяснившая многие свойства металлов присутствием в них свободных электронов. Согласно этой теории, атомы в металлах не в состоянии удерживать свои наружные электроны, так что в узлах кристаллической решетки расположены не нейтральные атомы, а положительные ионы. Оторвавшиеся от них электроны могут свободно перемещаться независимо друг от друга и от ионов (рис. 75), поэтому их называют свободными. Свободные электроны движутся беспорядочно по всем направлениям, сталкиваясь с ионами и снова отрываясь от них. Вылететь наружу электроны не могут (они могут кратковременно вылетать лишь на небольшое расстояние от поверхности; при этом возникают силы, втягивающие их обратно, — подробнее это явление будет разобрано дальше, в § 125).

2. В электронной теории предполагается, что электризация металла происходит только путем приобретения или потери свободных электронов. Если металл зарядился отрицательно, это значит, что он получил от какого-либо тела лишние электроны. Если металл зарядился положительно, значит он потерял часть своих электронов.

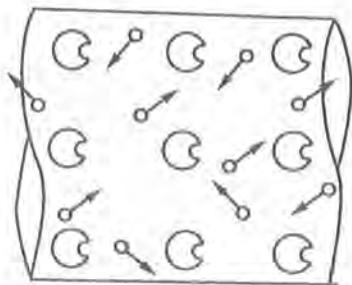


Рис. 75

Поскольку свободные электроны могут свободно перемещаться по проводнику, приобретенный металлом заряд не остается в том месте, где он первоначально появился. Если какому-либо участку добавили «лишние» электроны, то они, отталкиваясь друг от друга, растекутся по всему про-

воднику (точнее, по всей поверхности проводника). Если, наоборот, отнять электроны от данного участка, то в это место устремятся электроны со всех других участков, и всюду будет наблюдаться некоторая нехватка электронов.

3. В изоляторах свободных электронов нет. Все электроны в нем связаны с атомами.

Упр. 1. При соприкосновении цинковой пластинки с медной цинковая, как показывает опыт, получает положительный заряд, а медная — отрицательный. Как переказать этот факт на языке электронной теории?

§ 70. Проводники в электрическом поле

1. Опыт показывает, что если незаряженный проводник внести в электрическое поле, то на концах проводника возникают разноименные заряды. Это явление легко наблюдать, если к концам проводника прикрепить легкие листочки, играющие роль электроскопов (рис. 76). Когда проводник приближают к заряженному телу, листочки расходятся, когда удаляют — листочки снова сходятся. Возникновение разноименных зарядов на концах проводника, помещенного в электрическое поле, называют электростатической индукцией. Заряды, возникшие таким образом, называют наведенными, или индуцированными.

2. Объяснить возникновение индуцированных зарядов нетрудно. В любом проводнике имеются свободные заряды, способные легко перемещаться по проводнику (в металлах

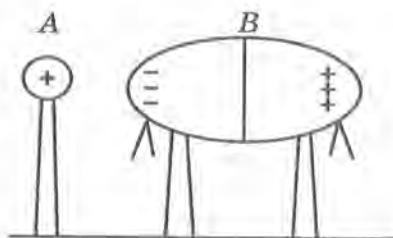


Рис. 76

такими свободными зарядами являются электроны). Если проводник поместить в электрическое поле (например, в поле положительного заряда A , как показано на рис. 76), то свободные заряды проводника B начнут перемещаться. В результате на одном конце проводника B возникнет избыток отрицательных зарядов, а на другом конце — избыток положительных зарядов. Если проводник вынести из электрического поля, заряды снова перемешаются.

3. Индуцированные заряды можно сохранить в проводнике и после того, как заряд, возбудивший их, будет удален. Например, можно проводник B сделать разъемным и после того, как в нем индуцированы заряды, разнять на 2 части. Можно поступить иначе: один из концов проводника B соединить на короткое время с землей (например, дотронуться до него рукой). Тогда заряды, одноименные с «возбуждающим» зарядом (A), уйдут в землю, и в проводнике B останется избыток зарядов другого знака.

4. Вследствие электростатической индукции незаряженные проводники всегда притягиваются к заряженным телам. Если незаряженный проводник (B на рис. 76) поместить вблизи заряда A , то на концах проводника возникнут равные разноименные заряды. Заряд, ближайший к телу A , будет притягиваться к нему, а дальний — отталкиваться. Преобладать будет притяжение, так как «близкий» заряд именно из-за своей близости к телу A будет взаимодействовать с ним сильнее, чем дальний.

§ 71. Поле внутри проводника

1. Если в электрическое поле внести проводник, то во всех точках внутри проводника поле исчезнет, когда в проводнике установится равновесие зарядов. Чтобы понять, почему так получается, рассмотрим некоторую точ-

ку M , находящуюся на определенном расстоянии от заряда A (рис. 77а), и проследим, как изменится напряженность поля в этой точке, если внести сюда проводник. Сначала определим, куда был направлен вектор напряженности в этой точке, когда проводник отсутствовал.

Для этого надо мысленно поместить в эту точку пробный положительный заряд и определить направление действующей на него силы. Проделав это, видим, что вектор напряженности (\vec{E}_0) направлен в точке M вправо.

Пусть теперь сюда внесли проводник так, что точка M очутилась внутри проводника (рис. 77б). На концах этого проводника возникнут вследствие электростатической индукции разноименные заряды. Эти добавочные заряды создадут свое добавочное поле, которое будет накладываться на первоначальное. Помещая мысленно в точке M пробный положительный заряд, видим, что напряженность этого добавочного поля направлена в точке M влево, т. е. «наперекор» первоначальному. Таким образом, после появления проводника напряженность поля в точке M уменьшилась.

Поставим теперь вопрос: при каком условии свободные электроны внутри проводника (B) перестанут перемещаться (и заряды на концах проводника B перестанут расти)? Очевидно, это произойдет лишь тогда, когда напряженность результирующего поля всюду внутри проводника B уменьшится до нуля. Таким образом, если за-

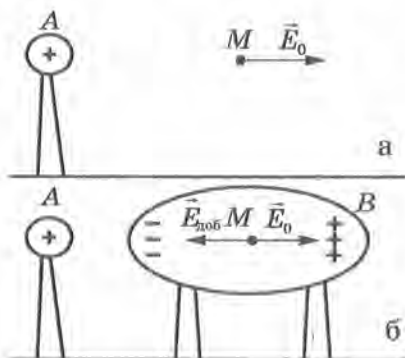


Рис. 77

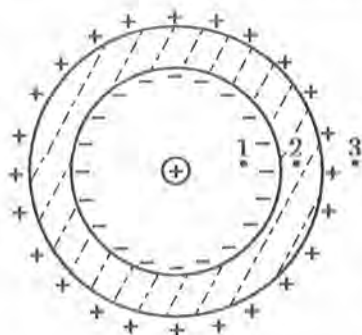


Рис. 80

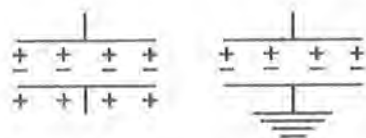


Рис. 81

сфер). Очевидно, на внутренней поверхности сферы выступит заряд противоположного знака, а на наружной — одноименный заряд, как показано на рис. 80 (явление электростатической индукции). Изменится ли после появления сферы поле вокруг шарика, например, в точках 1, 2, 3?

Упр. 5. На рис. 81 изображены два плоских конденсатора, первый изолирован, у второго нижняя пластина заземлена. Верхней пластине сообщили заряд $+q$. Докажите, что индуцированные в нижней пластине заряды в первом случае равны $-\frac{q}{2}$ и $+\frac{q}{2}$, во втором случае $-q$.

Указание. Используйте тот факт, что результирующее поле в нижней пластине равно нулю.

§ 72. Работа в электрическом поле

На всякий заряд, помещенный в электрическом поле, действует со стороны поля сила, и если заряд перемещается, то эта сила совершает определенную работу. Докажем, что *работа сил электрического поля не зависит от формы траектории*. Это значит, что если данный заряд перемещать из данной точки A в данную точку B разными путями (например, перемещать рукой заряженный

шарик, снабженный изолирующей ручкой, по траекториям, показанным на рис. 82), то во всех этих случаях силы поля совершат одинаковую работу.

Проведем доказательство для частного случая, когда поле однородное. Пусть один и тот же заряд q переносят из точки A однородного поля в точку B различными путями: $AB, ACDB, AKFB$ (рис. 83). Вычислим работу сил поля в каждом из этих случаев, если расстояние между A и B равно d . Учтем, что формула $A = Fs$ применима лишь в тех случаях, когда направление перемещения совпадает с направлением силы. Если сила направлена под прямым углом к траектории, работа такой силы считается равной нулю. В общем случае определением работы является формула

$$A = Fs \cos \alpha,$$

где α — угол между направлением силы и направлением перемещения. Таким образом, получаем $A_{AB} = Fd$; $A_{ACDB} = 0 + Fd + 0 = Fd$. Пусть, наконец, заряд перенесли по произвольной кривой $AKFB$. Весь путь можно разбить на малые участки, каждый из которых (если он достаточно малый) можно считать отрезком прямой. Работа, совершаемая электрическими силами при перемещении по такому участку, равна

$$\Delta A = F \Delta s \cos \alpha = F \Delta d.$$

Полная работа при перемещении из A в B складывается из работ на всех участках:

$$A = F \Delta d_1 + F \Delta d_2 + \dots + F \Delta d_n = F(\Delta d_1 + \Delta d_2 + \dots + \Delta d_n) = Fd.$$

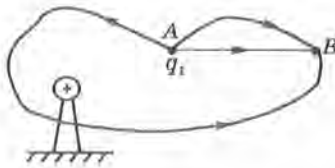


Рис. 82

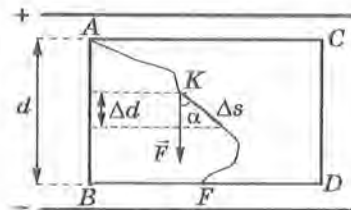


Рис. 83

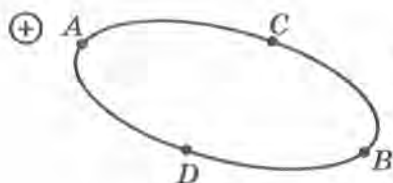


Рис. 84

Мы видим, что во всех случаях работа получилась одинаковой. Можно доказать, что *таким свойством (независимостью работы от формы траектории) обладает не только однородное, но и любое электрическое поле.*

Упр. 1. Заряд переместили по замкнутой кривой (например, по кривой $ACBDA$ на рис. 84). Докажите двумя разными способами, что работа сил поля равна нулю.

Решение. 1-й способ. Поскольку работы на участках ACB и ADB равны, т. е. $A_{ACB} = A_{ADB}$, то $A_{ACB} = -A_{BDA}$. Отсюда $A_{ACB} + A_{BDA} = 0$.

2-й способ. Поскольку работа не зависит от формы траектории, она будет такой же, как если бы заряд переместили из A в ту же точку A «по кратчайшему пути», т. е. если бы его вообще не перемещали.

Упр. 2. В точке A находится неподвижно закрепленный положительный заряд. Какую работу (положительную, отрицательную или нуль) совершают силы поля, если другой положительный заряд: а) отодвигают от A ; б) приближают к A ; в) двигают по дуге окружности, центром которой является точка A ?

§ 73. Потенциал

Независимость работы электрических сил от формы траектории дает возможность ввести важную для расчетов электрических явлений величину — потенциал. *Потенциал данной точки равен той потенциальной энергии, которой обладал бы единичный положительный заряд, помещенный в данную точку.* Другими словами, потенциал φ данной точки поля равен работе,

которая была бы совершена полем при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в ту, что принята за нулевую. Если заменить заряд в 1 Кл другим (например, зарядом $q^{(1)}$), то электрические силы, действующие на заряд со стороны поля, изменятся во столько же раз, во сколько изменился заряд. В результате работа сил поля (A) и равная ей потенциальная энергия (W_p) изменится в то же число раз. Таким образом, потенциал φ в данной точке можно вычислить, поделив потенциальную энергию помещенного в эту точку заряда на его величину:

$$\varphi = \frac{W_p}{q^{(1)}} = \frac{A}{q^{(1)}}.$$

Единицей потенциала в системе СИ является вольт: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Другими словами, если потенциал точки равен 1 В, это значит, что при перенесении заряда в 1 Кл из данной точки в нулевую силы поля совершают работу в 1 Дж.

«Нулевую» точку можно выбирать произвольно. Выбирают ее так, чтобы измерять или вычислять потенциалы разных точек данного поля можно было наиболее простым способом¹.

¹ Произвольность выбора нулевой точки потенциала можно сравнить с произвольностью выбора нулевой точки при отсчете высоты. Если надо указать, на какой высоте установить на стенке полку, то это можно сделать многими способами, например: а) на высоте +20 см от крышки письменного стола; б) на высоте +120 см от пола; в) на высоте +4 м от пола предыдущего этажа; г) на высоте -200 см от потолка комнаты и т. д. Числа получаются разными, но все они одинаково правильно характеризуют (по высоте) одну и ту же точку.

Фактической причиной того, что выбор нулевой точки не существен, является то, что в решение любой задачи с потенциалами входит не сам потенциал, а разность потенциалов двух точек. Эта разность, как разность высот двух полок на стенке, не зависит от выбора нулевого уровня.

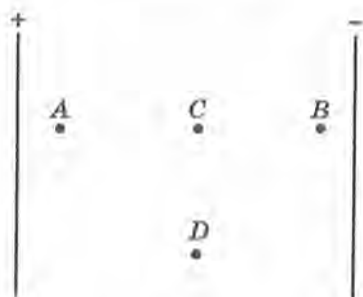


Рис. 85

Упр. 1. Что называется потенциалом поля в данной точке A ?

Указание. Ответить можно, по меньшей мере, двойко, например: «Величина, численно равная той потенциальной энергии, ...» или «величина, численно равная той работе, ...».

Упр. 2. Точка A расположена возле положительной

пластины плоского конденсатора, точка B — возле отрицательной, а C — посередине (рис. 85). Каков знак потенциала в точке C : положительный или отрицательный? *Ответ:* Ответить на этот вопрос можно только после того, как выбрана нулевая точка. Выбор этот произволен. Если в качестве нулевой выбрана точка B , то потенциал точки C положителен, так как при переносе из C в B единичного положительного заряда силы поля совершат положительную работу. Если в качестве нулевой выбрана точка A , то потенциал точки C отрицателен, а если выбрана сама точка C , то потенциал ее равен нулю.

Упр. 3. Где потенциал выше: в точке C или в точке A (рис. 85)?

Ответ: Потенциал точки A выше (независимо от того, какая точка принята за нулевую).

Упр. 4. Потенциал какой точки выше: C или D (точка D равноудалена от A и B , но находится вне отрезка AB) (рис. 85)?

Упр. 5. Одинаков ли потенциал точек A и B , расположенных на одинаковом расстоянии от точечного заряда (рис. 86)?

Указание. Выберем нулевую точку O произвольно и представим, что пробный положительный заряд двигали

не по прямой BO , а сначала по дуге BA , затем по прямой AO . Теперь надо сравнить работу сил поля на участке AO и BAO .



Рис. 86

§ 74. Условия равновесия зарядов в проводниках

1. Легко доказать, что *заряды в проводнике находятся в равновесии лишь тогда, когда потенциалы всех точек проводника одинаковы*. В самом деле, равновесие зарядов в проводнике возможно лишь в том случае, если поле в проводнике отсутствует (в противном случае под действием сил поля свободные заряды проводника начали бы двигаться). Но если поля в проводнике нет, то при переносе пробного заряда из произвольной точки A , лежащей внутри проводника, в «нулевую» точку O (рис. 87) силы поля совершают работу только на наружном участке BO . Значит, потенциал любой произвольной точки A , A_1 и т. д. этого проводника таков же, как и любой «пограничной» точки B , A_1 и т. д.

2. Мы получили простой признак, с помощью которого легко определить, будут ли перетекать заряды от одного проводника к другому, если соединить их между собой проводником, или не будут. Если потенциалы обоих тел были равны, то заряды не будут перетекать, если же они были не равны, то заряды будут перемещаться до тех пор, пока потенциалы этих тел не сравняются (положительные заряды будут

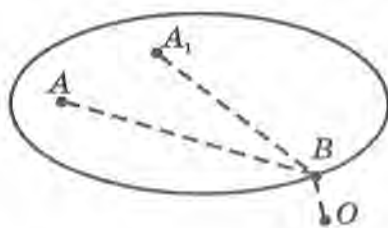


Рис. 87

перетекать от большего потенциала к меньшему). Подобно этому, вода в двух сосудах, если их соединить между собой, будет в равновесии лишь в том случае, если уровни в них одинаковы. Если уровни не равны, вода будет перетекать от более высокого уровня к низшему, пока уровни не сравняются.

§ 75. Разность потенциалов двух точек.

Напряжение и его связь с напряженностью поля

1. Разность потенциалов двух точек не зависит от выбора нулевого уровня, подобно тому, как разность высот двух полок не зависит от того, от какого именно уровня отсчитывали их высоты: от пола, от потолка и т. п. В самом деле, пусть надо сравнить потенциалы точек A и B (рис. 88). Выберем нулевую точку O совершенно произвольно и будем перемещать единичный положительный заряд из A в O не «прямо», а через точку B (мы имеем право так делать, поскольку работа в электрическом поле не зависит от формы траектории). Потенциал точки B измеряется работой сил поля при переносе единичного положительного заряда на участке BO , а потенциал точки A — на участке ABO . Участок BO является общим, стало быть, искомая разность потенциалов определяется работой сил поля на участке AB . Ясно, что работа на этом участке никак не связана с выбором нулевого уровня.

Если перемещенный заряд не равен единице, то, чтобы найти разность потенциалов между начальной и конечной точкой, надо поделить совершенную работу на величину перенесенного заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1,2}}{q^{(1)}}.$$

Разность потенциалов между начальной и

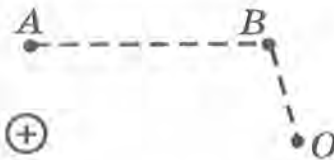


Рис. 88

конечной точкой часто называют напряжением и обозначают буквой U .

2. Рассмотрим случай, когда поле однородное и обе точки лежат на одной силовой линии. В этом случае

$$U = \frac{A}{q^{(1)}} = \frac{Fd}{q^{(1)}} = Ed; U = Ed.$$

Упр. 1. Напряжение между пластинами плоского воздушного конденсатора, изолированного от других тел, равно 300 В. Каким станет это напряжение, если уменьшить расстояние между пластинами вдвое?

Упр. 2. Напряженность поля часто измеряют в В/м. Покажите, что $V/m = N/Kл$.

Упр. 3. Между пластинами плоского конденсатора находится электрон. Напряжение между пластинами 0,01 В, а расстояние между ними 1,6 см. Что больше: сила тяжести электрона или электрическая сила? Во сколько раз? (Необходимые данные можно взять в § 67.)

Упр. 4. В одном из опытов по определению заряда электрона между пластинами конденсатора помещалась масляная капля массой $8 \cdot 10^{-16}$ кг. Расстояние между пластинами конденсатора 7 мм. Какое напряжение надо приложить к конденсатору, чтобы уравновесить каплю, если она потеряет один электрон?

О т в е т: 350 В.

Упр. 5. Потенциал положительной пластины D плоского конденсатора равен +300 В (за нуль принят потенциал отрицательной пластины). Каков потенциал точек B и C , если точка B расположена на расстоянии $d/3$ от отрицательной пластины, а C — на расстоянии $2d/3$ (где d — расстояние между пластинами).

Упр. 6. Покажите, как выглядит график зависимости $\varphi(d)$ для плоского конденсатора (внутри и вне конденсатора), где d — расстояние от отрицательной пластины. За нуль примите потенциал отрицательной пластины.

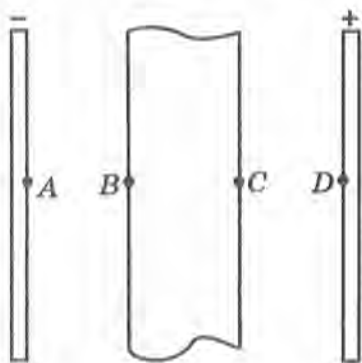


Рис. 89

Упр. 7. Начертите тот же график (см. *упр. 6*), если за нуль принять потенциал положительной пластины.

Упр. 8. Внутри конденсатора, описанного в *упр. 5*, параллельно его пластинам поместили незаряженную металлическую пластину толщиной $d/3$, расположив ее между *B* и *C* (рис. 89). Каким станет потенциал точек *B*, *C*, *D*?

У к а з а н и е. Покажите на своем чертеже заряды, индуцированные на пластине, и выясните, изменится ли в результате появления этих зарядов поле на участках *AB*, *BC*, *CD*.

О т в е т: 100 В, 100 В, 200 В.

§ 76. Расчет потенциала в поле точечного заряда

1. Разберем, как рассчитать потенциал точки 1, отстоящей на расстоянии R_1 от точечного заряда q (рис. 90а). Для этого надо мысленно поместить в эту точку пробный заряд q' и рассчитать работу, совершенную силами поля при перемещении пробного заряда из данной точки 1 в нулевую. Нулевой будем считать бесконечно далекую точку¹. Разделив работу на величину перенесенного заряда, получим потенциал этой точки.

Поскольку сила, действующая на пробный заряд, различна в разных точках (убывает обратно пропорциональ-

¹ Одной из причин такого выбора является то, что при таком выборе нулевой точки формула потенциала принимает наиболее простой вид.

но квадрату расстояния), работу нельзя рассчитывать по формуле $A = Fs$. Для расчета работы надо весь путь разбить на множество мелких участков, настолько мелких, чтобы силу в пределах каждого участка можно было без большой погрешности считать постоянной. Затем надо рассчитать работу на каждом участке и найти сумму всех этих «элементарных работ».

$$\text{Работа на участке номер «}n\text{» } \Delta A_n = F_n \Delta R_n = n \frac{qq^{(1)}}{R_n^2} \Delta R_n.$$

$$\begin{aligned} \text{Суммарная работа на всех участках } A_n &\approx \sum_n n \frac{qq^{(1)}}{R_n^2} \cdot \Delta R_n = \\ &= nqq^{(1)} \sum_n \frac{\Delta R_n}{R_n^2}. \end{aligned}$$

Точное значение работы равно пределу этой суммы (когда каждое $\Delta R_n \rightarrow 0$). Поскольку постоянные величины можно выносить за знак предела, получаем $A = nqq^{(1)} \times \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \sum_n \frac{\Delta R_n}{R_n^2} = nqq^{(1)} \frac{1}{R_1}$ (так как предел этой суммы, т. е. $\int_{R_1}^{\infty} \frac{dR}{R^2} = \frac{1}{R_1}$). Разделив эту работу на величину перенесенного пробного заряда,

получим потенциал интересующей нас точки

$$\varphi = n \frac{q}{R_1}.$$

2. Весь ход расчета можно пояснить с помощью графика, где показана зависимость силы от расстояния (рис. 90б). Площадь под каждой «ступенькой» равна работе на данном участке, а суммарная площадь под

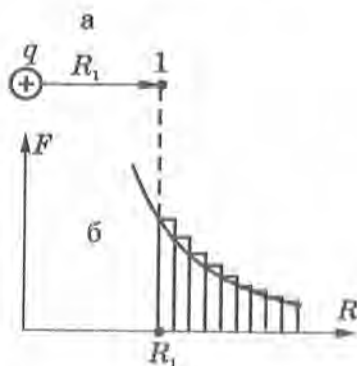


Рис. 90

ступенчатым графиком приближенно равна искомой работе. Чем уже «ступеньки», тем точнее расчет. Точное значение работы равно площади под кривой линией (т. е. равно пределу суммы отдельных площадей, когда ширина каждой ступеньки стремится к нулю).

3. Используя принцип суперпозиции, можно рассчитать потенциал поля, созданного двумя зарядами или даже любой системой зарядов. В отличие от напряженности поля потенциал есть величина скалярная, поэтому потенциалы складываются алгебраически.

4. Множество точек, обладающих одинаковыми потенциалами, называют эквипотенциальной поверхностью (или, в более общем случае, эквипотенциальной областью).

Упр. 1. В точке A прямой ABC помещен положительный точечный заряд. Покажите на графике $E(R)$, какую площадь надо измерить, чтобы рассчитать потенциалы точек B и C ? Потенциал какой из этих точек больше?

Упр. 2. В точке A прямой $ABCD$ помещен положительный точечный заряд. Точка C лежит посередине между B и D . Объясните, пользуясь графиком $E(R)$, что больше: разность потенциалов между B и C или между C и D ?

Упр. 3. Металлическая сфера радиуса R_0 имеет заряд q . Рассчитайте: а) потенциал точки, находящейся вне сферы на расстоянии R от ее центра; б) потенциал сферы; в) потенциал центра сферы.

О т в е т: а) Поскольку однородно заряженная сфера создает снаружи такое же поле, как точечный заряд, помещенный в ее центре, ясно, что работа сил поля при переносе единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность будет такой же, как если бы поле было создано точечным зарядом. Значит, потенциал указанной точки будет равен $k \frac{q}{R}$; б) $k \frac{q}{R_0}$; в) потенциал всех точек внутри сферы (в том числе и в ее центре) будет та-

ким же, как потенциал поверхности сферы (так как работа сил поля внутри сферы равна нулю).

Упр. 4. Проведите эквипотенциальную поверхность, проходящую через заданную точку M , расположенную: а) внутри плоского конденсатора; б) в поле точечного заряда.

Упр. 5. Докажите, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциальной поверхности.

Упр. 6. В точке A прямой $ABCD$ находится положительный заряд. Как изменится разность потенциалов между B и C (увеличится или уменьшится), если в точку D поместить отрицательный заряд?

Упр. 7. Металлическая сфера заряжена положительно. Покажите, как выглядят графики зависимостей $E(R)$ и $\varphi(R)$ (внутри и вне сферы).

Упр. 8. Электрон, масса которого m , а заряд $q_0 = -e$ (где e — положительное число), пролетел в вакууме из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 . В первой точке его скорость была v_1 . Какова будет его скорость v_2 во второй точке?

Решение. 1-й способ. Согласно закону сохранения энергии $W_p' + W_k' = W_p'' + W_k''$, или $q_0\varphi_1 + \frac{mv_1^2}{2} = q_0\varphi_2 + \frac{mv_2^2}{2}$. Вместо q_0 надо подставить $(-e)$ и решить полученное уравнение.

2-й способ. Согласно теореме о кинетической энергии

$$\Delta W_k = A_{\text{всех сил}} \text{ или } \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ и т. д.}$$

Упр. 9. Расстояние между зарядами q_1 и q_2 равно R_1 . Какую работу совершат силы поля, если: а) второй заряд отодвинут от первого до расстояния R_2 ; б) первый заряд отодвинут от второго до расстояния R_2 ?

Ответ: $kq_1q_2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$.

Упр. 10. Электрон, масса которого m , а заряд $q_0 = -e$, летит со скоростью v_0 из бесконечно далекой точки по на-

правлению к неподвижно закрепленному заряду $-Q$. На какое минимальное расстояние приблизится он к заряду?

Указание. См. решение к *упр. 8*.

Ответ: $\frac{2eQ}{mv_0^2}$.

Упр. 11. Согласно упрощенной модели атом водорода состоит из ядра с зарядом $Q = +e$ и электрона с зарядом $q_0 = -e$, вращающегося по орбите радиусом R . Чему равна потенциальная энергия электрона? За нуль принят потенциал бесконечно далекой точки.

Ответ: $-k \frac{e^2}{R}$.

Упр. 12. Потенциал точки M , отстоящей на расстояние R от точечного заряда q , равен $k \frac{q}{R}$, если за нуль принят потенциал бесконечно далекой точки. Каким был бы потенциал точки M , если бы за нуль приняли потенциал точки, отстоящей на расстояние R_1 от заряда q ?

§ 77. Измерение разности потенциалов между проводниками

1. Для измерения разности потенциалов между двумя проводниками можно использовать электроскоп с металлическим корпусом. Например, чтобы измерить разность потенциалов между пластинами конденсатора, надо одну пластину соединить со стержнем электроскопа, а другую — с корпусом (рис. 91). Между стержнем и корпусом установится такая же разность потенциалов, как между пластинами конденсатора. Поле внутри электроскопа зависит только от этой разности потенциалов, так как посторонние поля почти не проникают сквозь металлический корпус (хотя он и не охватывает прибор целиком). С другой стороны, угол отклонения стрелки определяется ее зарядом и распределением поля внутри электроскопа. То и другое однозначно определяется разностью по-

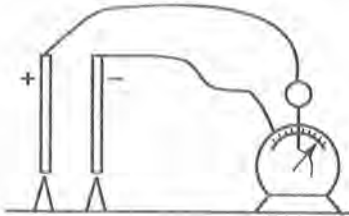


Рис. 91

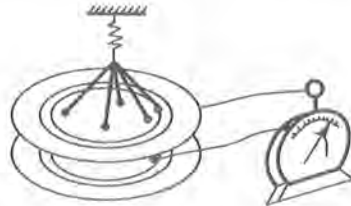


Рис. 92

тенциалов, приложенной к электроскопу, значит, по отклонению стрелки можно судить об этой разности.

2. Такой прибор можно назвать электростатическим вольтметром. Чтобы проградуировать его, надо иметь другой — эталонный вольтметр. Эталонным вольтметром может служить плоский конденсатор, снабженный динамометром, измеряющим силу взаимодействия между пластинами (рис. 92). Такой конденсатор сравнительно легко проградуировать, так как легко рассчитать, какая сила соответствует данной разности потенциалов (см. *упр. 1* к этому параграфу). Чтобы исключить краевой эффект, конденсатор окружают «охранными кольцами», к которым подводят такую же разность потенциалов, как к пластинам.

Упр. 1. Рассчитайте силу взаимодействия пластин плоского конденсатора, если дана разность потенциалов U , расстояние между ними d и площадь S каждой пластины.

Решение. Поле, созданное каждой из пластин, $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{q}{2\epsilon_0 S}$. Сила, действующая на одну из пластин, равна ее заряду q , помноженному на поле E , созданное другой пластиной:

$$F = qE = (2\epsilon_0 SE)E = 2\epsilon_0 SE^2$$

Поскольку поле между пластинами создано зарядами обеих пластин, то разность потенциалов между ними $U = 2Ed$. Отсюда

$$F = 2\varepsilon_0 S \left(\frac{U}{2d} \right)^2 = \frac{\varepsilon_0 S U^2}{2d^2}$$

§ 78. Емкость конденсатора

1. Иногда в небольшом объеме надо сосредоточить большой заряд. Но если небольшой проводник, например, в форме пластинки соединить с одним из полюсов источника напряжения (рис. 93), то сильно зарядить пластинку не удастся. По мере того как пластинка будет заряжаться, она все сильнее будет отталкивать прибывающие к ней из источника заряды, и в конце концов приток зарядов к ней приостановится.

Чтобы увеличить приток зарядов к этой пластинке, можно поместить вблизи нее другую пластинку (на рис. 93 она показана пунктиром), заряженную противоположным по знаку зарядом. Заряды этой пластинки начнут притягивать к себе заряды противоположного знака, и первая пластинка начнет дозаряжаться. Подобное у-

стройство, состоящее из двух проводников, разделенных диэлектриком, называют конденсатором. Конденсаторы позволяют легко накапливать большие заряды в небольшом объеме пространства («конденсировать» заряды). Чтобы зарядить конденсатор, можно подсоединить его к аккумулятору или к другому источнику напряжения. Источник перегонит электроны с одной пластины на другую. Ясно, что заряды

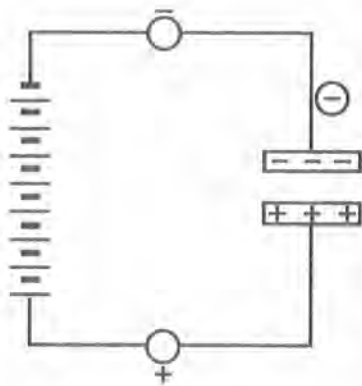


Рис. 93

обеих пластин будут в этом случае одинаковы по абсолютной величине. Только такой случай заряженного конденсатора мы и будем рассматривать. Зарядом конденсатора в этом случае называют заряд одной из его пластин.

2. Подобно тому, как разные газовые баллоны при одинаковом давлении содержат разные массы данного газа, разные конденсаторы при одинаковом напряжении между пластинами содержат разные заряды. Чем больше заряд конденсатора (при данном напряжении), тем большей считается его емкость. *Условились емкость считать численно равной заряду конденсатора при напряжении между пластинами в одну единицу.* Например, если при $U = 2$ В заряд $q = 10$ Кл, то емкость конденсатора $C = 10/2 = 5$ Кл/В. В общем случае емкость определяется формулой

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Единица емкости в СИ носит название «фарад» (в честь Фарадея). На практике приходится измерять емкость в менее крупных единицах: микрофарадах и пикофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$; $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

3. Емкость конденсатора зависит от площади его пластин, от расстояния между ними и от вида диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами (от материала самих пластин емкость не зависит). Рассчитаем емкость плоского конденсатора, т. е. такого, у которого расстояние между пластинами во много раз меньше их размеров. В этом случае поле, созданное каждой из пластин, можно рассчитать по формуле бесконечной плоскости

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad (\text{мы считаем, что конденсатор вакуумный,}$$

т. е. что между пластинами конденсатора находится вакуум). Суммарное поле, созданное обеими пластинами, $E =$

$$= 2E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 S}, \text{ а напряжение между пластинами } U = Ed =$$

$$= \frac{qd}{\varepsilon_0 S}. \text{ Подставляя это в формулу (1), получаем } C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \text{ За-}$$

бегая несколько вперед (см. § 81 и 82), напишем более общую формулу:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами конденсатора (для воздуха $\varepsilon = 1,0006 \approx 1$).

Упр. 1. Расстояние между пластинами плоского конденсатора увеличили в 2 раза. Как изменится напряженность поля между пластинами, разность потенциалов между ними и заряд пластин? Рассмотреть два случая: а) пластины изолированы от других тел; б) пластины соединены с аккумулятором, поддерживающим постоянное напряжение между пластинами. (Желательно при решении не использовать понятие емкости.)

Упр. 2. Как изменится емкость плоского воздушного конденсатора (увеличится или уменьшится), если между пластинами, параллельно им, установить незаряженную металлическую пластину такой же формы и площади, как пластины конденсатора? Рассмотреть два случая: а) пластина очень тонкая; б) пластина толстая.

У к а з а н и е. Сначала выясните, изменится ли напряженность поля в разных областях внутри конденсатора после появления индуцированных зарядов на пластине.

Упр. 3. Поставьте ладони рук параллельно друг другу и представьте, что это — пластины воздушного конденсатора. Покажите, какими двумя способами проще всего уменьшить емкость такого конденсатора.

Упр. 4. Докажите, что при параллельном соединении двух конденсаторов (рис. 94) общая емкость такой «батареи» равна сумме емкостей каждого из конденсаторов.

Упр. 5. Чему равна емкость воздушного конденсатора, у которого каждая пластина имеет форму круга диаметром 20 см, если расстояние между ними 1 см?

О т в е т: Около 30 пФ.

Упр. 6. Разность потенциалов между двумя точками, расположенными внутри плоского конденсатора, равна U . Между этими точками переместили заряд q . Какую работу совершат силы поля: а) в этом случае; б) в случае, если одну из пластин конденсатора убрать?

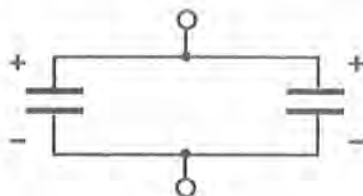


Рис. 94

§ 79. Применение конденсаторов

1. Конденсатор может служить копилкой зарядов. Конденсатор очень большой емкости (порядка 1000 мкФ) применяют в фотовспышках. Подобно тому, как бачок в уборной долго наполняется тонкой струей воды, а затем мгновенно опорожняется, конденсатор в фотовспышке несколько секунд заряжается от батареи и менее чем за тысячную долю секунды разряжается на лампу. При этом через лампу протекает заряд, в тысячи раз превышающий тот, который лампа могла бы получить за это короткое время от батареи.

2. Особенно широко используются конденсаторы в радиоэлектронных устройствах. Конденсатор входит в состав колебательного контура. Меняя емкость конденсатора (входящего в состав контура), тем самым настраивают радио- и телевизионные приемники на нужную волну. В выпрямителях конденсаторы служат для сглаживания пульсирующего тока. С помощью конденсаторов в электронных устройствах «рассортировывают» электрические токи, отделяя постоянный ток от переменного, если они перемешались в одном проводе (соответствующие всем этим случаям схемы приведены в третьей части пособия).

§ 80. Энергия заряженного конденсатора

1. Заряженный конденсатор обладает определенной потенциальной энергией. Проще всего это продемонстрировать, заставив проскочить между его пластинами искру (с помощью подсоединенных к пластинам проводов). При проскакивании электрической искры выделяется тепло (и излучаются радиоволны). Чтобы рассчитать энергию конденсатора, надо представить, что его полностью разрядили, и рассчитать работу, совершенную при этом силами поля. Поскольку работа сил электрического поля не зависит от пути перехода, можно представить, что весь заряд одной из пластин перенесли на другую вместе с самой пластиной. Искомая работа будет равна произведению заряда q перемещаемой пластины на разность потенциалов между начальной и конечной точками, созданную неподвижной пластиной. Эта разность вдвое меньше разности потенциалов U между пластинами конденсатора, поскольку разность потенциалов между пластинами создается совместными «усилиями» обеих пластин ($U = 2E_1d$, где E_1 — напряженность поля, созданного каждой из пластин). Таким образом,

$$W_p = A = q \frac{U}{2} = CU \frac{U}{2}; \quad W_p = \frac{CU^2}{2}.$$

2. Вся эта энергия, как показали исследования, распределена в пространстве, где сосредоточено электрическое поле конденсатора. Таким образом, электрическое поле обладает определенной энергией.

Упр. 1. Докажите, что энергия электрического поля, сосредоточенная в единице объема (т. е. объемная плотность), $\rho = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$.

Указание. В формулу энергии конденсатора подставьте $U = Ed$ и поделите полученное выражение на объем, занимаемый электрическим полем (т. е. на объем, заключенный между пластинами конденсатора).

Упр. 2. Рассчитайте энергию заряженного конденсатора, если известны: а) C и U ; б) q и U ; в) q и C .

Упр. 3. Пластины плоского конденсатора, изолированного от других тел, отодвинули друг от друга так, что расстояние между ними удвоилось. Во сколько раз изменилась энергия конденсатора? Откуда взялась добавочная энергия?

§ 81. Диэлектрики в электрическом поле

1. Опыт показывает, что если в пространстве между пластинами конденсатора поместить пластину, например, из стекла (рис. 95), то напряжение между пластинами конденсатора уменьшится. Это говорит о том, что напряженность поля в пространстве между пластинами уменьшилась. Если вместо стекла вносить другие диэлектрики, то окажется, что все они уменьшают напряжение, но по-разному.

Мы знаем, что в проводниках, когда их вносят в электрическое поле, на поверхности возникают заряды, которые создают поле, направленное наперекор первоначальному. В результате поле внутри проводника уменьшается до нуля. Исследования показали, что и на поверхности диэлектрика возникают заряды, частично компенсирующие действие зарядов конденсатора (рис. 96). Возникновение разноименных зарядов на поверхностях диэлектрика, помещенного в электрическое поле, называется поляризацией диэлектрика.

2. Рассмотрим подробнее, что происходит в диэлектриках при поляризации. Поскольку свободных зарядов в диэлектриках нет, поляризация не может быть следствием перемещения свободных зарядов. Заряды в диэлектриках могут перемещаться только в пределах молекулы, в результате чего молекула может изменить свои размеры или повернуться. Рассмотрим молекулы, у которых при отсутствии внешнего поля «центры тяжести» по-

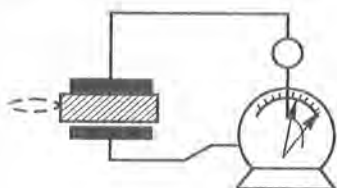


Рис. 95

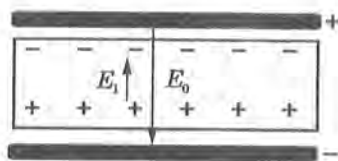


Рис. 96

ложительных и отрицательных зарядов совпадают, т. е. эти заряды действуют так, как если бы все они находились в одной точке (рис. 97а). Если такая молекула очутится в электрическом поле (например, в поле заряда Q , как показано на рис. 97б), то ее отрицательные заряды сдвинутся слегка в одну сторону (на нашем рисунке влево), а положительные — в другую. *Совокупность двух равных разноименных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называют диполем.*

Таким образом, в электрическом поле все молекулы диэлектрика становятся диполями.

Каков будет суммарный эффект от смещения зарядов во всех молекулах данного тела? Рассмотрим сначала слой, расположенный внутри диэлектрика (например, слой, помеченный на рис. 98 буквой А). Когда внешнего поля не было, в этом слое было поровну положительных и отрицательных зарядов. После появления поля отрицательные заряды всех молекул сместятся в одну сторону (на рис. 98 влево), положительные — в другую. В результате часть отрицательных зарядов перейдет в соседний слой (расположенный левее данного). Но число отрицательных зарядов в рассматриваемом слое А от этого не уменьшится, так как в него «вдвинется» такое же количество отрицательных зарядов из слоя, расположенного справа. Так же будет обстоять дело с положительными зарядами. Подобная картина будет наблюдаться во всех внутренних слоях тела. Иначе обстоит дело на краях.

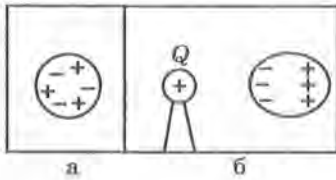


Рис. 97

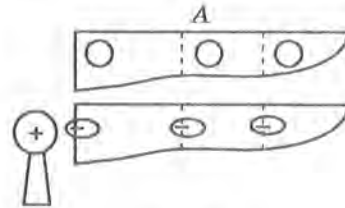


Рис. 98

На одном краю (на левом) возникнет избыток отрицательных зарядов, на другом (на правом) — положительных.

3. **Возникшие на краях диэлектрика заряды называются поляризационными.** В результате появления этих зарядов поле внутри диэлектрика ослабится. Объясняется это, как и в случае проводников, тем, что возникшие на концах тела заряды создают «свое» электрическое поле, направленное «наперекор» первоначальному (рис. 96). Однако в диэлектриках заряды не имеют такой свободы перемещения, как в проводниках, где заряды перемещаются до тех пор, пока созданное ими поле не «уничтожит» первоначальное. В диэлектриках поле не исчезает полностью, а ослабляется. Число, показывающее, во сколько раз уменьшится напряженность поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом, называется диэлектрической проницаемостью данного вещества. Это число обозначают греческой буквой ϵ . У стекла $\epsilon = 5$, у воды $\epsilon = 81$; у воздуха $\epsilon = 1,0006$, так что электрическое поле в воздухе практически такое же, как в вакууме.

4. Благодаря поляризации незаряженные легкие тела из диэлектрика (бумажки, пушинки и т. п.) притягиваются к заряженным телам. Если притягиваемое тело является проводником, то оно притягивается благодаря явлению электростатической индукции: на концах проводника возникают разноименные заряды (рис. 51). Заряд, ближайший к заряженному телу, будет притягиваться к нему, а дальний — отталкиваться. Преобладать будет притяжение,

так как близкий заряд будет взаимодействовать с телом сильнее, чем дальний. В точности то же самое происходит и с незаряженным диэлектриком, внесенным в электрическое поле, с той разницей, что заряды на его концах возникают не вследствие перемещения свободных электронов, а вследствие поляризации диэлектрика.

5. Если проводник, находящийся в электрическом поле, разделить на две части, то каждая из частей окажется заряженной (§ 70, пункт 3). Если то же самое сделать с поляризованным диэлектриком, то каждая часть останется в целом нейтральной. Поэтому *поляризационные заряды часто называют связанными*.

Упр. 1. В чем сходство и различие явлений электростатической индукции и поляризации?

Упр. 2. Между пластинами уединенного плоского конденсатора внесли пластину из диэлектрика (рис. 96) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4$. Как изменится электрическое поле в диэлектрике и в зазорах между диэлектриком и пластинами?

О т в е т : В диэлектрике уменьшится в 4 раза, в зазорах не изменится.

Упр. 3. Толщина диэлектрика (см. упр. 2) втрое меньше расстояния между пластинами диэлектрика. До внесения диэлектрика напряжение между пластинами конденсатора составляло 120 В. Каким станет: а) напряжение между поверхностями диэлектрика; б) суммарное напряжение в обоих зазорах; в) напряжение между пластинами конденсатора?

О т в е т : а) 10 В; б) 80 В; в) 90 В.

§ 82. Сводка формул электростатики

Если все пространство вокруг заряда или системы зарядов заполнить диэлектриком, то напряженность поля во всех точках уменьшится в ϵ раз: $E = \frac{E_0}{\epsilon}$, где E_0 — напряженность поля в вакууме, а E — в диэлектрике. Поэтому

и потенциал данной точки ($\varphi = \int_{R_1}^{\infty} E dR = \int_{R_1}^{\infty} \frac{E_0}{\epsilon} dR$), и разность потенциалов между пластинами уединенного конденсатора ($U = Ed = \frac{E_0}{\epsilon} d$) уменьшатся в ϵ раз, а емкость конденсатора ($C = \frac{q}{U} = \frac{q}{U_0/\epsilon}$) в ϵ раз увеличится. Приводим сводку всех приведенных ранее формул электростатики (кроме закона Кулона) для общего случая, когда все пространство заполнено диэлектриком.

Таблица

Определение	Результаты вычислений
$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^{(1)}}$	$E = k \frac{q}{\epsilon R}$ $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0 \epsilon}$, где $\sigma = \frac{q}{S}$
$\varphi_1 = \frac{W_p}{q^{(1)}} = \frac{A_1}{q^{(1)}}$	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1,2}}{q^{(1)}}$ $U = Ed$ $\varphi = k \frac{1}{\epsilon R}$
$C = \frac{q}{U}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ $W_p = \frac{CU^2}{2}$ $\rho = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$
$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$	

§ 83. Закон Кулона в диэлектриках

Чтобы реальные макроскопические тела поместить внутри диэлектрика, необходимо в нем сделать полости (в жидких и газообразных телах такие полости возникают автоматически, так как тела вытесняют жидкость или газ из занимаемого ими объема). На границах полости выступают поляризационные заряды, и поле внутри полости уже не будет равно $\frac{E_0}{\epsilon}$, а станет другим. Поэтому вычисление силы, действующей на макроскопический заряд, помещенный в твердый диэлектрик, является сложной задачей¹.

Когда речь идет о жидком или газообразном диэлектрике, то надо учитывать еще одно обстоятельство. В электрическом поле, как показало подробное исследование, на жидкость или газ действуют силы, стремящиеся сжать или, наоборот, растянуть эту среду. Таким образом, полная сила электрического происхождения, действующая на заряд, помещенный в жидкость или газ возле другого заряда, складывается из трех сил: а) силы со стороны другого заряда; б) силы со стороны поляризационных зарядов; в) силы упругости со стороны деформированной в электрическом поле среды. Результат оказался неожиданно простым. Оказалось, что результирующая этих трех сил выражается формулой

$$F = k \frac{qq^{(1)}}{\epsilon R^2}.$$

¹ Отсюда также следует, что при определении напряженности с помощью формулы $E = \frac{F}{q^{(1)}}$ мы в качестве пробного заряда, помещенного в диэлектрик, должны представлять не макроскопическую частицу, а электрон, и под величиной E понимать среднее значение «микроскопической» напряженности в области, окружающей данную точку.

Г Л А В А 8

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 84. Электрический ток

В любом проводнике имеются свободные заряды, беспорядочно движущиеся по всем направлениям. В металлах такими зарядами являются электроны (рис. 75), в электролитах — положительные и отрицательные ионы. Если в проводнике создать и каким-то способом поддерживать постоянное электрическое поле (для этого служат «источники тока»), то свободные заряды, не прекращая хаотического движения, станут двигаться направленно (подобно рою мошек, сдуваемому ветром). *Направленное движение зарядов называют электрическим током. За направление тока приняли направление движения положительных зарядов, т. е. направление, обратное движению электронов.*

§ 85. Сила тока

1. Через каждое поперечное сечение проводника, по которому идет ток, непрерывно переносятся электрические заряды. *Заряд, переносимый в единицу времени, называют силой тока.* Если за время t через поперечное сечение проводника перенесен заряд q , то сила тока

$$I = \frac{q}{t}.$$

Единицей силы тока является **ампер** — такой ток, когда каждую секунду переносится заряд в один кулон.

2. Подобно тому, как количество воды, протекающее за единицу времени в разных сечениях реки, одинаково,

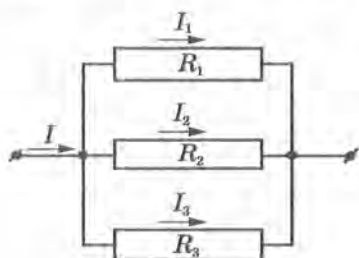


Рис. 99

если река не имеет притоков и отводов¹, так и сила тока во всех участках последовательной цепи одинакова. Если бы сила тока в разных сечениях была разной, то в отдельных участках цепи непрерывно накапливались бы заряды; вследствие этого электрическое поле в проводнике непрерывно менялось бы, и ток не мог бы оставаться постоянным.

Если ток разветвляется на несколько параллельных ветвей (рис. 99), то (как и в случае реки, разветвляющейся на несколько рукавов) ток до разветвления равен сумме токов после разветвления:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Это утверждение, как и утверждение об одинаковости тока в разных сечениях последовательной цепи, следует из закона сохранения заряда и из того факта, что ни в одном участке не происходит накопления зарядов.

3. Для измерения силы тока применяют амперметры. Поскольку сила тока во всех участках последовательной цепи одинакова, ясно, что амперметр надо включать в цепь последовательно, причем безразлично, в каком месте последовательной цепи он включен.

¹ В периоды наводнений и в периоды обмеления рек этот закон нарушается. Он верен только при «стационарном» течении, когда количество воды, протекающей каждую секунду через каждое сечение, не меняется. Это ограничение относится и к электрическому току. Если сила тока не является постоянной, а меняется с течением времени, то равенство токов во всех сечениях может нарушиться.

Упр. 1. Конденсатор емкостью 1000 мкФ зарядили до напряжения 50 В за 0,5 с. Какова средняя сила заряжающего тока?

О т в е т : 0,1 А.

Упр. 2. Сколько электронов протекает в одну микросекунду через нить настольной лампы, если сила тока в ней 0,1 А?

О т в е т : 630 миллиардов.

§ 86. Действия тока

1. О наличии тока в данной цепи можно узнать по его действиям: *тепловому, химическому или магнитному*. Тепловое действие проявляется в том, что проводник, по которому протекает ток, нагревается. Химическое — в том, что при протекании тока может меняться химический состав проводника (например, при протекании тока через раствор медного купороса на одном из электродов выделяется медь). Магнитное действие проявляется в том, что магнитная стрелка, помещенная возле проводника с током, отклоняется. Магнитное действие проявляется у всех без исключения проводников, тогда как химическое — только в электролитах, а тепловое отсутствует у сверхпроводников.

2. Для обнаружения и измерения тока можно использовать любое из этих действий. Подавляющее большинство амперметров и вольтметров используют магнитное действие тока.

§ 87. Напряжение

1. Разность потенциалов между двумя точками электрической цепи называют напряжением. При последовательном соединении проводников (рис. 100) напряжение между концами данного участка равно сумме напряжений на отдельных проводниках

$$U = U_1 + U_2 + U_3,$$

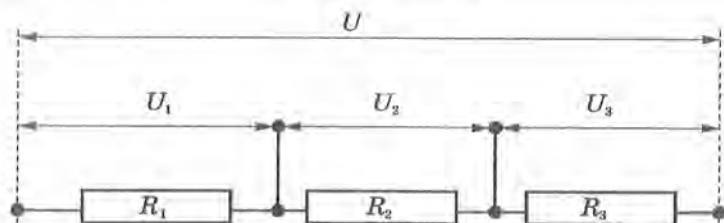


Рис. 100

Это следует из определения термина «разность потенциалов»: она численно равна работе, совершенной силами поля при переносе через данный участок единичного положительного заряда, а работа на данном участке равна сумме работ на отдельных частях этого участка.

2. При параллельном соединении проводников (рис. 99) разность потенциалов между концами всех проводников одна и та же. Это следует из того факта, что работа сил электрического поля не зависит от формы траектории: при переносе единичного положительного заряда по любой из параллельных ветвей работа сил поля (а следовательно, и разность потенциалов) будет одной и той же.

3. Для измерения напряжения применяют вольтметры. Ясно, что вольтметр надо подключать параллельно тому участку, где надо измерить напряжение. В этом случае разность потенциалов между концами участка и концами вольтметра будет одной и той же.

§ 88. Закон Ома для участка цепи

1. Опыт (рис. 101) показывает, что в металлах сила тока в данном проводнике пропорциональна напряжению, приложенному к концам этого проводника, если

температура проводника поддерживается постоянной¹. Отсюда следует, что отношение напряжения к силе тока есть величина постоянная для данного проводника (например, если вдвое увеличить напряжение, то вдвое увеличится и

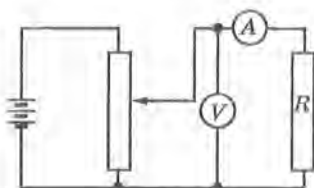


Рис. 101

сила тока, так что отношение этих величин не изменится). Но у разных проводников это отношение оказывается различным. Например, если одинаковое напряжение подвести к разным проводникам, то токи в них будут разными. Таким образом, отношение $\frac{U}{I}$ вполне определенным образом характеризует электрические свойства данного проводника. Эту величину назвали *сопротивлением*:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единицей сопротивления в СИ является Ом — сопротивление такого проводника, где при напряжении в 1 В возникает ток в 1 А. Величина, обратная сопротивлению (т. е. $1/R$), называется *проводимостью*.

¹ Для того чтобы установить закон Ома, надо иметь амперметр и вольтметр. Но при создании вольтметров используется закон Ома. Получается своего рода заколдованный круг. Подобная ситуация возникает и при установлении некоторых других законов физики (например, первого закона Ньютона). Дело в том, что, в отличие от математики, изучение которой можно сравнить с восхождением по лестнице (каждое новое понятие, каждая новая теорема основываются на материале, изученном ранее), изучение физики можно сравнить с распутыванием сети, когда многократно надо возвращаться к одним и тем же узлам. Некоторые законы физики сначала были не очень строго обоснованы экспериментально (наполовину были угаданы), и только развитие следствий из этих законов позволило «задним числом» надежно установить правильность этих законов.

ление увеличится, а если добавить параллельно, то уменьшится.

Упр. 2. Докажите, что при последовательном соединении нескольких резисторов общее сопротивление всегда больше наибольшего, а при параллельном — меньше наименьшего.

§ 91. Задачи на последовательное и параллельное соединение

1. Начертите схему, состоящую из источника тока, рубильника, двух лампочек, включенных параллельно друг другу, вольтметра, измеряющего напряжение на лампочках, и амперметра, измеряющего общий ток ламп.

2. Цепь состоит из трех последовательно соединенных резисторов. Сопротивление одного из них 10 Ом, другого — 20 Ом, третьего — 30 Ом. К концам цепи подведено напряжение 120 В. Каково напряжение на каждом из резисторов?

О т в е т: 20 В; 40 В; 60 В.

3. Лампу, рассчитанную на напряжение 12 В и ток 2 А, надо включить в сеть, где напряжение 20 В. Каково должно быть сопротивление добавочного резистора?

О т в е т: 4 Ом.

4. Шнур настольной лампы длиной 1 м сделан из медного провода площадью сечения 1 мм^2 . Лампа потребляет ток 0,1 А. На сколько вольт напряжение на лампе меньше, чем в розетке?

5. (Устно.) Пять одинаковых резисторов по 100 Ом каждый включены: а) последовательно; б) параллельно. Чему равно сопротивление цепи в первом и во втором случаях?

6. Напряжением работает электродвигатель, удаленный от генератора на 250 м, если проводка выполнена медным проводом с площадью сечения 10 мм^2 , а ток в проводе равен 20 А?

О т в е т: 223 В.

7. Цепь состоит из трех резисторов: 2 Ом, 4 Ом и 6 Ом, соединенных параллельно. Через первый резистор сопротивлением 2 Ом протекает ток 12 А. Каков ток в общем проводе?

О т в е т: 22 А.

8. Имеются три одинаковых резистора по 6 Ом каждый. Какие сопротивления можно получить, соединяя их между собой всеми возможными способами?

О т в е т: 2 Ом; 18 Ом; 9 Ом; 4 Ом.

9. Начертите четыре схемы из предыдущей задачи. Пусть к концам каждой из этих цепей подведено напряжение 12 В. Каково будет напряжение на концах каждого резистора?

О т в е т: а) 12 В; б) 4 В; в) 4 В и 8 В; г) 6 В и 12 В.

10. Цепь состоит из трех одинаковых резисторов. Два из них включены параллельно друг другу, а третий — последовательно с участком, состоящим из первых двух резисторов. К концам цепи подведено напряжение 120 В. Сколько вольт приложено к каждому резистору?

О т в е т: 40 В и 80 В.

11. Из проволоки изготовили квадрат ABCD. Сопротивление каждого ребра 1 Ом. Каково сопротивление квадрата: а) между точками А и С; б) между точками А и D?

О т в е т: а) 1 Ом; б) 0,75 Ом.

12. Две лампы (не обязательно одинаковые) включены последовательно. К концам цепи подведено неизменное напряжение. Как изменится напряжение на первой лампе (увеличится или уменьшится), если параллельно ей включить еще одну лампу?

13. Докажите, что если параллельно данному резистору подключить другой, сопротивление которого во много раз больше, чем первого (например, параллельно резистору в 1 Ом подключить 1000 Ом), то общее сопротивление этого участка почти не изменится.

Р е ш е н и е. а) С помощью формул; б) Допустимо еще такое рассуждение. Малое сопротивление можно представить в виде толстой проволоки, а большое — в виде тонкой (той же длины и из того же материала). Если параллельно толстой проволоке подсоединить тонкую (пло-

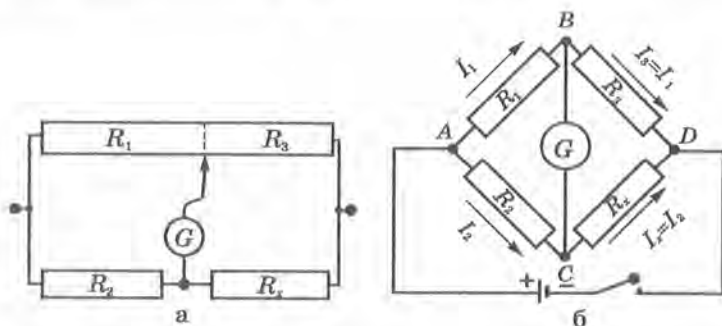


Рис. 102

щадь сечения которой в 1000 раз меньше, чем у толстой), то общая площадь сечения участка практически не изменится, значит не изменится и сопротивление.

14. Мостик Уитстона. Для измерения сопротивлений, если требуется высокая степень точности, применяют прибор, схема которого показана на рис. 102а и 102б. Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 (выполненные в виде магазина эталонных сопротивлений) подбирают в процессе измерения так, чтобы ток в измерительном приборе был равен нулю. Докажите, что в этом случае $R_x = R_2 R_3 / R_1$.

Решение. Отсутствие тока в диагонали BC моста означает, что $I_1 = I_3$ и $I_2 = I_x$. С другой стороны, отсутствие тока в диагонали означает, что потенциалы точек B и C одинаковы, т. е. $U_{AC} = U_{AB}$ и $U_{CD} = U_{BD}$. Последние два равенства можно переписать так:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3,$$

$$I_1 R_3 = I_2 R_x.$$

Деля эти равенства почленно друг на друга, находим R_x .

15. Начертите схему простейшего пробника — прибора, позволяющего быстро обнаруживать, имеется ли обрыв в данном участке цепи (от которой отключен источник тока) или нет. В состав пробника входит батарейка, миллиамперметр и резистор.

§ 92. Расчеты с помощью пропорций

Многие расчеты (особенно устные) облегчаются, если пользоваться такими следствиями закона Ома:

1. Падение напряжения¹ на разных участках последовательной цепи пропорционально сопротивлениям этих участков (рис. 103). В самом деле, во всех участках последовательной цепи ток одинаков. Но из формулы $U = IR$ видно, что при одинаковом токе большему сопротивлению соответствует большее (во столько же раз) падение напряжения. Это можно вывести и алгебраически:

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2,$$

откуда $\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}$.

Пример. Резисторы сопротивлением 5 Ом и 15 Ом соединены последовательно. Напряжение на первом из них равно 30 вольт. Каково напряжение на втором резисторе? Решить: а) устно; б) письменно.

Решение. (рис. 103): а) (Устное.) Сопротивление второго резистора втрое больше, чем первого. Значит, и напряжение на нем втрое больше, т. е. равно 90 В; б) (Письменное): $\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}$, отсюда $U_2 = 90$ В.

2. Сила тока в различных ветвях параллельной цепи обратно пропорциональна сопротивлениям этих ветвей (рис. 104). В самом деле, на концах всех ветвей данного участка напряжение одно и то же. Но из формулы $I = \frac{U}{R}$ видно, что при одинаковом напряжении большему сопротивлению соответствует меньший (во столько же раз) ток. Это можно вывести и алгебраически:

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

откуда $\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2}$.

¹ Падением напряжения называют произведение IR .

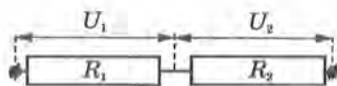


Рис. 103

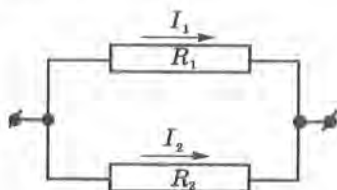


Рис. 104

Пример. Резисторы сопротивлением 5 Ом и 15 Ом соединены параллельно. Ток в первом из них равен 6 А. Каков ток во втором резисторе? Решить: а) устно; б) письменно.

Решение. (рис. 104): а) (Устное.) Второе сопротивление втрое больше, чем первое. Значит, ток в нем втрое меньше, т. е. равен 2А; б) (Письменное):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2}, \text{ отсюда } I_2 = 2\text{А.}$$

Упр. 1. Решите устно упр. 10 к § 91.

§ 93. Потенциометр

1. Потенциометром, или делителем напряжения, называют устройство, с помощью которого можно получить любую долю напряжения U , подведенного к потенциометру. Потенциометр устроен так же, как реостат, но имеет не две, а три клеммы (рис. 105). Клеммы AB , к которым подводится напряжение сети, называют входом потенциометра, а клеммы AC — выходом. Если движок C установлен посередине обмотки AB , то напряжение на выходе AC составит половину напряжения U . Если движок C передвинуть к клемме A , то напряжение на выходе уменьшится (если, к примеру, $AC = \frac{1}{4}AB$, то напряжение на выходе составит $\frac{1}{4}U$. Перемещая движок по участку от A до B , мы имеем возможность менять напряжение на выходе от нуля до U .

2. Все это справедливо при условии, что к выходу AC потенциометра не подключено никакой нагрузки (или же сопротивление нагрузки достаточно велико). Если это не так, то расчет усложняется. Пусть, к примеру, сопротивление обмотки AB равно $10\,000\ \text{Ом}$, а движок C установлен посередине. Если к выходу AC подключен вольтметр сопротивлением $5000\ \text{Ом}$, то напряжение на выходе

составит не $\frac{U}{2}$, а $\frac{U}{3}$ (так как сопротивление между A и C будет равно $2500\ \text{Ом}$, т. е. составит $\frac{1}{3}$ сопротивления между A и B).

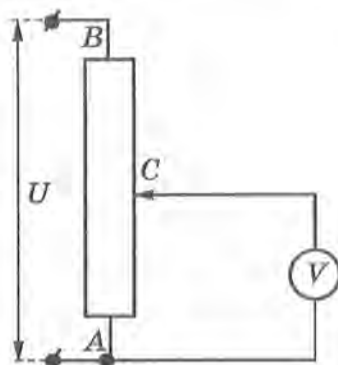


Рис. 105

Упр. 1. Можно ли, имея источник тока, менять напряжение между пластинами конденсатора с помощью: а) реостата; б) потенциометра?

§ 94. Каким должно быть сопротивление амперметра и вольтметра

Измерительные приборы обладают определенным сопротивлением. Поэтому после включения измерительного прибора в цепь сопротивление цепи меняется. Меняется, следовательно, и ток в цепи, а также напряжение на отдельных участках. Выходит, что прибор измеряет совсем не тот ток или напряжение, которые были в этом участке до включения прибора. Чтобы этого не было, прибор должен обладать таким сопротивлением, чтобы после его включения сопротивление цепи заметно не менялось.

Амперметр включается в цепь последовательно. Чтобы сопротивление цепи после такого включения заметно не менялось, *амперметр должен обладать малым сопротивлением*. Сопротивление хорошего амперметра должно быть в сотни раз меньше, чем сопротивление цепи, в которую он включается. Обычно сопротивление амперметра составляет ничтожные доли ома.

Вольтметр включается в цепь параллельно. Чтобы сопротивление цепи после такого включения заметно не менялось, *вольтметр должен обладать большим сопротивлением*¹. Сопротивление хорошего вольтметра должно быть в сотни раз больше, чем сопротивление участка, параллельно которому он включается. Обычно сопротивление вольтметра составляет тысячи и десятки тысяч Ом.

Упр. 1. При измерении напряжения на лампочке ученик вместо вольтметра включил по ошибке амперметр. Объясните, что произошло.

О т в е т: Амперметр сгорел.

§ 95. Увеличение пределов измерения вольтметра и амперметра

1. Пределы измерения любого вольтметра легко увеличить, подключив последовательно с ним резистор (рис. 106). Пусть сопротивление добавочного резистора такое же, как у вольтметра. Тогда напряжение на резисторе будет равно напряжению на вольтметре. Значит, напряжение между концами *A* и *C* участка, параллельно которому включен вольтметр с резистором, будет вдвое больше того, что показывает вольтметр. Другими словами, пределы измерения вольтметра увеличили таким способом в 2 раза.

¹ Из формулы параллельного соединения следует, что если параллельно данному проводнику подключают другой, во много раз более «высокоомный», то первоначальное сопротивление участка почти не меняется (см. задачу 13 из § 91).



Рис. 106

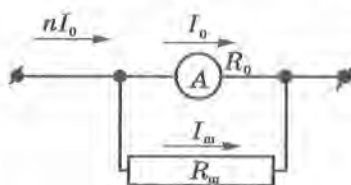


Рис. 107

Можно увеличить пределы измерения вольтметра не вдвое, а в любое число раз. Рассчитаем, каково должно быть сопротивление $R_{доб}$ добавочного резистора, чтобы пределы измерения вольтметра увеличились в n раз. Сопротивление самого вольтметра пусть равно R_0 . Увеличение пределов измерения в n раз означает, что в то время, как на вольтметре (между точками A и B) напряжение равно U_0 , на концах AC интересующего нас участка оно равно nU_0 . Это возможно лишь в том случае, если на добавочном резисторе будет создано падение напряжения $nU_0 - U_0$. Теперь составляем пропорцию (см. § 92, пункт 1): $\frac{nU_0 - U_0}{U_0} = \frac{R_{доб}}{R_0}$, откуда находим $R_{доб}$.

Можно вольтметр снабдить тремя клеммами: A , B и C . К клеммам AB подводить напряжение, не превышающее U_0 , а к клеммам AC — более высокое, вплоть до nU_0 . Поскольку резисторы в сотни раз дешевле вольтметра, выгоднее приспособить один вольтметр на разные пределы измерения, чем иметь для этой цели разные вольтметры. К тому же удобнее иметь под рукой один прибор на несколько пределов измерений, чем несколько отдельных приборов (подобно тому, как удобнее иметь часы с часовой и минутной стрелками, чем два отдельных измерителя времени).

2. Пределы измерения любого амперметра легко увеличить, подключив параллельно ему резистор, называемый шунтом (рис. 107). Пусть сопротивление шунта та-

кое же, как амперметра. Тогда ток в шунте будет равен току в амперметре. Значит, ток в общем проводе (где мы хотим измерить силу тока) будет вдвое больше того, что показывает амперметр. Другими словами, пределы измерения амперметра увеличили таким способом в 2 раза.

Можно увеличить пределы измерения амперметра не вдвое, а в любое число раз. Рассчитаем, каково должно быть сопротивление $R_{ш}$ шунта, чтобы пределы измерения амперметра увеличились в n раз. Сопротивление самого амперметра пусть равно R_0 . Увеличение пределов измерения в n раз означает, что в то время, как в амперметре ток равен I_0 , в общем проводе (где мы хотим измерить силу тока) он равен nI_0 . Это будет возможно лишь в том случае, если ток в шунте будет $nI_0 - I_0$. Теперь составляем пропорцию (см. § 92, пункт 2): $\frac{nI_0 - I_0}{I_0} = \frac{R_0}{R_{ш}}$, откуда находим $R_{ш}$.

Упр. 1. Вольтметр сопротивлением 500 Ом рассчитан на 3 В. Как увеличить пределы измерения этого вольтметра до 30 В?

У к а з а н и е. Начертите схему рис. 106 и проставьте на ней все данные.

О т в е т: Включить последовательно резистор сопротивлением 4500 Ом.

Упр. 2. Вольтметр сопротивлением 500 Ом рассчитан на 3 В. Последовательно с ним включили резистор сопротивлением 2000 Ом, так что первоначальный вольтметр вместе с этим резистором стал использоваться как новый вольтметр. Каковы пределы измерения нового вольтметра?

О т в е т: 15 В.

Упр. 3. Амперметр, рассчитанный на 1 А, имеет сопротивление 0,3 Ом. Как увеличить пределы измерения до 5 А?

О т в е т: Подключить шунт 0,075 Ом.

Упр. 4. Амперметр, рассчитанный на 1 А, имеет сопротивление 0,3 Ом. К нему подключили шунт сопротивлением 0,1 Ом. Каков предел измерения нового амперметра?

О т в е т: 4 А.

Упр. 5. Миллиамперметр сопротивлением 40 Ом расчитан на ток 5 мА. Из одного такого прибора надо сделать амперметр на 1 А, из другого — вольтметр на 1 В. Как это сделать?

О т в е т: Подключить шунт 0,201 Ом; включить последовательно резистор 160 Ом.

§ 96. Работа и мощность тока

1. При перемещении заряда q по данному участку цепи силы электрического поля совершают определенную работу. Принято называть ее *работой тока*. Из электростатики известно, что напряжение связано с работой формулой $U = \frac{A}{q}$. Отсюда $A = Uq$. Для электрических цепей эту формулу удобно преобразовать, введя туда не заряд, а силу тока $I = \frac{q}{t}$. После подстановки получаем

$$A = UIt.$$

Эта формула одновременно выражает энергию, поглощенную на данном участке (поскольку работа равна количеству превращенной энергии). Доставляемая к участку энергия отбирается от источника тока и переносится к данному участку с помощью электрического и магнитного поля.

2. Если данный участок является пассивным (т. е. в нем нет аккумуляторов, генераторов, электродвигателей и других источников сторонних сил, т. е. никаких сил, помимо тех, которые обусловлены приложенной разностью потенциалов), то закон Ома выражается формулой $I = \frac{U}{R}$ ¹. В этом случае можно для работы тока (для израс-

¹ Если в составе данного участка имеется аккумулятор или работающий электродвигатель и т. п., то закон Ома выражается формулой $I = \frac{U \pm \mathcal{E}}{R}$, где \mathcal{E} называется электродвижущей силой данного источника.

ходованной электроэнергии) получить еще два равносильных выражения:

$$A = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

3. Мощностью называется отношение работы к промежутку времени, за который она была произведена:

$$P = \frac{A}{t}; \quad P = UI.$$

Формулу $P = UI$ можно сравнить с формулой мощности водяной мельницы. Мельницу заданной мощности можно построить либо на горной речке с большим напором и тонкой струей, либо на равнинной реке с малым напором, но с широкой струей.

Для пассивного участка расчет потребляемой мощности можно производить еще по двум формулам:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

4. В СИ единицей работы и энергии является, как известно, джоуль, а единицей мощности — ватт. В технике и в быту иногда используют внесистемную единицу работы: киловатт-час. 1 кВт · ч — энергия, израсходованная за один час при мощности в 1 кВт.

Упр. 1. Сколько джоулей содержится в одном киловатт-часе?

Решение. 1 кВт · ч = 1000 Вт · 3600 с = 3,6 · 10⁶ Вт · с (т. е. джоулей).

Упр. 2. Включенная в сеть лампа накаливания ежесекундно получает от сети определенную энергию (например, 100 Дж). Казалось бы, вскоре после включения должно накопиться столько энергии, что нить должна расплавиться. Однако на деле этого не происходит. Объясните, почему.

Упр. 3. Увеличится или уменьшится мощность, потребляемая данной электроплиткой, если спираль укоротить?

Упр. 4. На электроплитках написано: 600 Вт, 220 В. Какую мощность будет потреблять каждая плитка, если в сеть с напряжением 220 В включить последовательно: а) две такие плитки; б) три такие плитки?

О т в е т: а) 150 Вт; б) 67 Вт.

§ 97. Закон Джоуля—Ленца

1. При прохождении тока по проводнику он нагревается. Объясняется это тем, что свободные электроны (если речь идет о металле), разгоняемые электрическим полем, сталкиваются с ионами, передавая им свою энергию. Увеличение энергии ионов означает, что проводник нагрелся.

Рассмотрим случай, когда проводник, по которому идет ток, не движется и в нем не происходит химических изменений. Тогда энергия, выделяемая в проводнике, не превращается ни в механическую (как это имеет место в электродвигателях), ни в химическую (как в электролитах), а целиком переходит в тепло. Из закона сохранения энергии следует, что количество выделенного в этом случае тепла равно количеству поглощенной в этом участке энергии:

$$Q = A,$$
$$Q = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

2. Если не вся подведенная к участку энергия переходит в тепло, а только часть (как это имеет место, например, в электродвигателе, где электрическая энергия преобразуется в основном в механическую), т. е. если $Q < A$, то приведенные выше три выражения для работы тока не являются равносильными. Это связано с тем, что формула $I = U/R$ к этим случаям неприменима. Для расчета энергии в этом случае годится только формула $A = UIt$, а для расчета количества тепла — только формула $Q = I^2 R t$. Таким образом, *количество выделенного тепла во всех случаях*

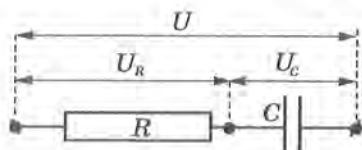


Рис. 108

равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и на время. Этот закон был установлен опытным путем английским физиком Джоулем и независимо от него русским физиком Ленцем.

3. Покажем на частном случае, почему $I^2 R t < U I t$. Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора R и конденсатора C , к которой подвели постоянную разность потенциалов U (рис. 108). Вначале в такой цепи возникнет ток, заряжающий конденсатор (этот ток прекратится, когда конденсатор зарядится до напряжения U). Рассмотрим, сколько энергии поглотит цепь за малый промежуток времени Δt (малый настолько, что ток I в цепи и напряжение U на конденсаторе в течение этого промежутка можно считать неизменными). За это время через каждый участок цепи (кроме промежутка между пластинами конденсатора) пройдет заряд Δq . Очевидно, $\Delta q U = \Delta q U_R + \Delta q U_C$.

Учитывая, что $\Delta q = I \Delta t$, $U_R = IR$, $\Delta q = C \Delta U_C$, имеем

$$I \Delta t U = I \Delta t IR + C U_C \Delta U_C,$$

$$U I \Delta t = I^2 R \Delta t + C U_C \Delta U_C.$$

Выражение слева есть энергия, потребленная всей цепью. Первое слагаемое в правой части есть количество тепла, выделенное в резисторе, второе слагаемое — энергия электрического поля накопления в конденсаторе¹. Мы видим, что $I^2 R \Delta t < U I \Delta t$, где левое выражение означает количество выделенного тепла, а правое — полную энергию, потребленную цепью.

¹ Для тех, кто умеет интегрировать, можно написать уравнение, выражающее полный расход энергии за все время зарядки:

$$\int U I dt = \int I^2 R dt + \frac{C U^2}{2}.$$

Упр. 1. К электродвигателю, сопротивление обмоток которого 2,5 Ом, приложена разность потенциалов 100 В. При работе двигателя он потребляет ток 2 А. Найдите: а) полную энергию, поглощенную из сети двигателя за 10 с; б) количество тепла, выделенное за это время в его обмотках; в) к. п. д. двигателя.

О т в е т: а) 2000 Дж; б) 100 Дж; в) $\frac{2000 - 100}{2000} = 0,95 = 95\%$.

Упр. 2. Сопротивление железной проволочки вдвое больше, чем медной. В какой из проволочек выделится больше тепла и во сколько раз больше, если их включить в сеть: а) последовательно; б) параллельно?

Упр. 3. К концам цепи, состоящей из электроплитки сопротивлением 54,5 Ом и соединительных проводов сопротивлением 0,5 Ом, подведено напряжение 220 В. а) Какой ток протекает по цепи? б) Каково падение напряжения в подводящих проводах? в) Сколько тепла выделится в подводящих проводах за 10 с? (Последний расчет сделайте дважды: по формуле $Q = I^2 R t$ и по формуле

$$Q = \frac{U^2}{R} t.)$$

О т в е т: а) 4 А; б) 2 В; в) 80 Дж.

Упр. 4. В электроплитке имеются две одинаковые обмотки. Если включить одну из них, чайник закипает через 20 мин. Через какое время закипит чайник, если включить обе обмотки: а) последовательно; б) параллельно?

О т в е т: а) 40 мин; б) 10 мин.

Упр. 5. В зимнем санатории имеется 100 электрокаминов мощностью 2,2 кВт каждый. Какой общий ток потребляли бы камины и какая мощность расходовалась бы в линии передачи сопротивлением 0,5 Ом, если напряжение на каминах было бы: а) 220 В; б) 22 000 В?

О т в е т: а) 1000 А; 500 кВт; б) 10 А; 0,05 кВт.

Упр. 6. Какова должна быть длина нихромового провода ($\rho = 110 \cdot 10^{-8}$ Ом · м) площадью сечения 1 мм², из которого сделана обмотка электрокамина мощностью 2,2 кВт, если напряжение камина было бы: а) 220 В; б) 22 000 В?

О т в е т: а) 10 м; б) 100 км.

§ 98. Роль источника тока

1. В состав любой электрической цепи должен входить источник тока, так что всю замкнутую цепь можно разбить на два участка: внешний (по отношению к источнику) и внутренний. Источник тока нужен для создания разности потенциалов между полюсами источника. Это достигается тем, что на одном полюсе создается избыток отрицательных зарядов, на другом — положительных (рис. 109). При этом во всех участках цепи создается электрическое поле. Под действием этого поля свободные заряды (электроны) во внешней цепи начнут двигаться. В результате заряд отрицательного полюса (откуда электроны уходят) и заряд положительного полюса (куда электроны приходят) начнут убывать. Для того чтобы предотвратить эту убыль, надо каждый прибывший к положительному полюсу заряд перебросить через источник к другому полюсу. При этом заряды, как видно из рис. 109, должны двигаться против сил электрического поля. Таким образом, *внутри источника на свободные заряды, помимо сил электрического поля, должны действовать добавочные силы*, способные перемещать заряд наперекор «кулоновым» силам. Такие силы называют *сторонними*. В генераторах электростанций эти силы («силы Лоренца») возникают благодаря движению проводников в магнитном поле.

2. Роль различных сил в замкнутой цепи можно сравнить с ролью разных сил при круговороте воды в замкнутой системе труб (рис. 110). Насос перегоняет воду снизу вверх, создавая между своими «полюсами» A и B определенную разность уровней. По внешнему участку ACB вода течет сама под действием силы тяжести. Во внутреннем участке BDA каждая прибывающая порция воды перебрасывается вверх наперекор силе тяжести. Внутри насоса на воду, помимо силы тяжести, действуют добавочные («сторонние») силы, способные преодолеть силу тяжести.

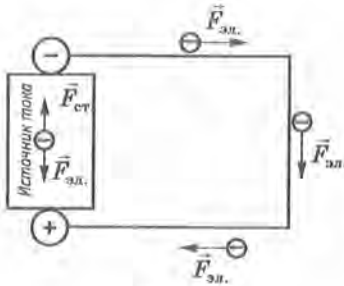


Рис. 109

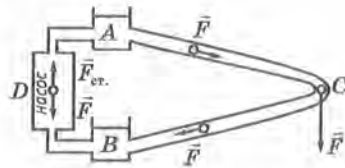


Рис. 110

§ 99. ЭДС источника и закон Ома для замкнутой цепи

1. При перемещении заряда через источник сторонние силы совершают определенную работу. Работа, совершенная сторонними силами при переносе через источник единичного заряда, называется *электродвижущей силой* (ЭДС) источника. Если при переносе заряда q совершена работа $A_{ст}$, то ЭДС

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}.$$

ЭДС, как и разность потенциалов, измеряется в вольтах. ЭДС данного источника обычно является величиной постоянной. Например, ЭДС гальванических элементов, используемых в карманных фонариках и переносных радиоустройствах, равна 1,5 В, ЭДС свинцовых аккумуляторов — 2 В, автомобильного аккумулятора — около 12 В и т. д.

2. Выведем формулу, показывающую, как ток в цепи зависит от ЭДС источника и от сопротивления цепи. Полное сопротивление цепи складывается из сопротивлений внешнего участка R и внутреннего участка r (рис. 111). В случае генератора сопротивление внутреннего участка —

это сопротивление обмоток генератора, в случае химического источника — сопротивление электролита и электродов.

Формулу выведем на основе закона сохранения энергии. Энергия, израсходованная сторонними силами при перемещении заряда q через источник тока, равна работе сторонних сил:

$$A_{\sigma} = \xi q = \xi It.$$

Будем считать, что во внешней цепи нет ни электродвигателей, ни аккумуляторов, которые надо заряжать, а вся энергия расходуется на нагрев цепи. При этом тепло выделяется не только во внешней цепи, но и в самом источнике. Количество выделенного тепла согласно закону Джоуля—Ленца

$$Q = I^2 R t + I^2 r t.$$

Все это тепло выделяется за счет энергии источника. Приравнивая правые части этих уравнений, получим

$$\xi = IR + Ir.$$

Произведение силы тока на сопротивление участка называют падением напряжения на данном участке. Таким образом, ЭДС источника равна сумме падений напряжения на внешнем и на внутреннем участках цепи. Вольтметр, подключенный к полюсам источника (рис. 112), является частью внешней цепи, поэтому он показывает падение напряжения во внешнем участке.

Из последней формулы следует

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

Сила тока в замкнутой цепи равна электродвижущей силе источника, поделенной на сумму сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи.

3. Из формулы $\xi = IR + Ir$ видно, что напряжение $U = IR$ на внешнем участке цепи (рис. 111) всегда меньше ЭДС и не является постоянной для данного источника ве-

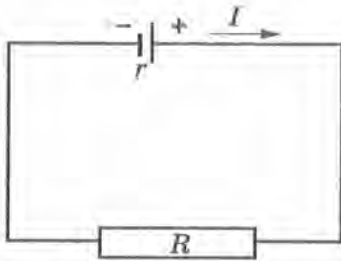


Рис. 111

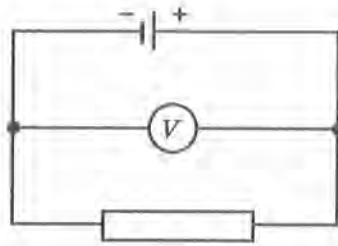


Рис. 112

личной. Чем больше ток в цепи, тем больше падение напряжения Ir на внутреннем участке и, следовательно, тем меньше напряжение $U = IR$ внешней цепи (так как сумма этих двух величин есть величина постоянная). Только в тех случаях, когда внутреннее сопротивление очень мало ($r \ll R$), можно пренебречь падением напряжения внутри источника и считать, что $U = IR \approx \mathcal{E} = \text{const}$.

Упр. 1. К источнику тока, ЭДС которого 24 В, а внутреннее сопротивление 2 Ом, подключен резистор сопротивлением 10 Ом (рис. 112). Чему равен ток в цепи, каково напряжение внешней цепи и падение напряжения внутри источника, и сколько вольт покажет высокоомный вольтметр, подключенный к полюсам источника?
О т в е т: 2 А; 20 В; 4 В; 20 В.

Упр. 2. К источнику, ЭДС которого 12 В, подключена лампа сопротивлением 20 Ом. Вольтметр, подключенный к полюсам источника, показал 10 В. Чему равно падение напряжения внутри источника, сила тока в цепи и внутреннее сопротивление источника?
О т в е т: 2 В; 0,5 А; 4 Ом.

Упр. 3. Когда к источнику подключили резистор сопротивлением 6 Ом, в цепи возник ток 3 А. Когда же вместо него включили резистор 10 Ом, ток стал 2 А. Какова ЭДС и внутреннее сопротивление источника?
О т в е т: 24 В; 2 Ом.

Упр. 4. ЭДС источника 12 В, а внутреннее сопротивление 2 Ом. Каково будет напряжение на зажимах источника, если сопротивление внешней цепи равно: а) 2 Ом; б) 22 Ом; в) 118 Ом?

Ответ: 6 В; 11 В; 11,8 В.

Упр. 5. Цепь состоит из источника тока, реостата, амперметра (включенного последовательно с реостатом) и вольтметра, подключенного к полюсам источника. Как изменятся показания амперметра и вольтметра, если сопротивление реостата уменьшить?

Указание. Сначала выясните, как изменится ток в цепи (ссылаясь на закон Ома для замкнутой цепи), затем — как изменится падение напряжения внутри источника и, наконец, — как изменится падение напряжения во внешней цепи.

§ 100. Как измерить ЭДС источника

Измерить ЭДС источника можно так: подключить к его полюсам высокоомный вольтметр, и если к источнику больше ничего не подключено, то измеренное напряжение можно считать равным ЭДС. В самом деле, вольтметр всегда показывает напряжение во внешней цепи $U = IR$. Эта величина, как видно из формулы

$$\mathcal{E} = Ir + IR,$$

всегда меньше ЭДС. Но если $R \gg r$ (а это условие обычно выполняется, если, кроме вольтметра, к источнику ничего больше не подключено), то первым слагаемым в правой части можно пренебречь, т. е. считать, что $\mathcal{E} = IR$.

Упр. 1. Какой процент составляет погрешность, когда мы считаем, что показания школьного вольтметра, подключенного к одному элементу от переносного приемника, равно ЭДС этого элемента? Сопротивление школьного вольтметра 400 Ом, внутреннее сопротивление элемента 0,2 Ом.

Ответ: 0,05%, что много меньше погрешности школьного вольтметра.

§ 101. Последовательное и параллельное соединение источников

1. Источники тока иногда приходится соединять друг с другом последовательно (рис. 113) или параллельно (рис. 114). Сопротивление такой батареи находится по обычным формулам последовательного или параллельного соединения. Что же касается ЭДС батареи, то тут можно различить три случая:

а) при последовательном соединении элементов ЭДС равна сумме ЭДС отдельных элементов;

б) при параллельном соединении элементов с одинаковыми ЭДС электродвижущая сила батареи равна ЭДС одного элемента;

в) при параллельном соединении элементов с различными ЭДС невозможно приписать батарее определенную ЭДС (не зависящую от сопротивлений элементов и внешней цепи). Расчет таких цепей мы рассматривать не будем.

2. Первое утверждение (касающееся ЭДС при последовательном соединении элементов) следует из того, что ЭДС по определению равна работе сторонних сил при перемещении через источник единичного положительного заряда, а работа на всем пути равна (по определению) алгебраической сумме работ на отдельных участках.

Второе утверждение (касающееся ЭДС при параллельном соединении элементов с одинаковыми ЭДС) разберем на примере батареи, состоящей из двух элементов. Пусть через один из них прошел заряд q_1 , а через другой — q_2 . ЭДС батареи

$$\mathcal{E}_{\text{бат}} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \frac{A_{\text{ст}1} + A_{\text{ст}2}}{q_1 + q_2} = \frac{q_1 \mathcal{E} + q_2 \mathcal{E}}{q_1 + q_2} = \mathcal{E}.$$

3. На практике приходится применять как параллельное, так и последовательное соединение источников. Например, генераторы на электростанциях соединяют параллельно друг с другом. На автомашине генератор переменного тока соединен через выпрямитель параллельно с

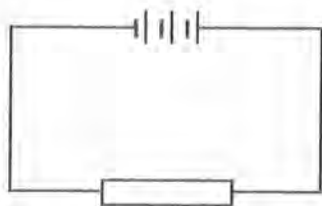


Рис. 113

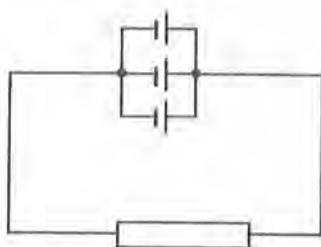


Рис. 114

аккумулятором. Для питания переносных приемников, магнитофонов и телевизоров применяют батареи, состоящие из последовательно соединенных элементов.

Упр. 1. Батарея состоит из n одинаковых элементов, соединенных: а) последовательно; б) параллельно. ЭДС каждого элемента равна \mathcal{E}_1 , а внутреннее сопротивление r_1 . Чему равен ток во внешней цепи, если сопротивление внешней цепи равно R ?

Ответ: а) $\frac{n\mathcal{E}_1}{nr_1 + R}$; б) $\frac{\mathcal{E}_1}{r_1 + R}$.

Упр. 2. Имеется несколько одинаковых элементов. Внутреннее сопротивление каждого элемента равно r . Каково должно быть сопротивление внешней цепи, чтобы при последовательном и при параллельном соединении этих элементов ток во внешней цепи был одинаковым? Ответ: r .

§ 102. Короткое замыкание

Коротким замыканием называют замыкание цепи проводником, имеющим ничтожно малое сопротивление. Обычно короткое замыкание получается в результате какой-либо неисправности, например, из-за случайного соединения проводов, питающих данный потребитель энергии (рис. 115). Ток при коротком замыкании может возрасти в десятки и сотни раз по сравнению с нормаль-

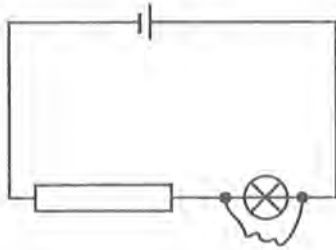


Рис. 115

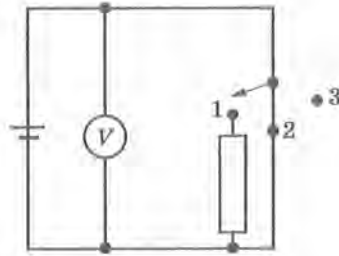


Рис. 116

ным током в данной цепи. Если короткое замыкание произошло на полюсах источника, то ток короткого замыкания ограничивается только внутренним сопротивлением источника:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} \text{ (при коротком замыкании).}$$

Короткое замыкание в электропроводке может привести к пожару из-за сильного разогревания проводов, выключателей и т. п. очень большим током. В лабораторной схеме короткое замыкание может привести к порче дорогих приборов, а также источника тока. Особенно опасны короткие замыкания в мощных сетях, передающих энергию от электростанций потребителям. Замыкание в такой сети может привести к ее разрушению и порче оборудования, питающего большой район. Между тем в некоторых случаях (например, в метро) даже кратковременный перерыв в подаче энергии равносиль тяжелой аварии. Для предотвращения нарушений и для своевременного отключения пораженных участков применяют сложные защитные устройства.

В маломощных цепях (квартирной проводке, лабораторных схемах и т. п.) для автоматического разрыва цепи при коротких замыканиях часто применяют плавкие предохранители. Такой предохранитель представляет собой тонкую легкоплавкую проволоку, включаемую последовательно в защищаемую цепь. Толщина проволоки

ки подбирается так, чтобы при заданной величине тока она расплавлялась. Ясно, что цепь при этом размыкается.

Упр. 1. К полюсам источника, ЭДС которого равна 12 В, а внутреннее сопротивление 2 Ом, подключен высокоомный вольтметр. Кроме того, во внешней цепи имеется переключатель на три положения (рис. 116). В первом положении между полюсами источника включается резистор сопротивлением 22 Ом, во втором положении внешняя цепь замыкается накоротко, в третьем положении к переключателю ничего не подключается. Сколько вольт покажет вольтметр в каждом из этих положений?

ГЛАВА 9

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 103. Понятие о магнитном поле

1. Между неподвижными электрическими зарядами действуют, как известно, кулоновские силы. Если заряды начинают двигаться, то, как показывает опыт, помимо электрических сил, на них начинают действовать добавочные силы, названные магнитными (рис. 117). Магнитное взаимодействие так же, как и любое другое, осуществляется посредством некоторого поля, которое называют (в данном случае) магнитным. Таким образом, *всякий движущийся заряд, помимо электрического поля, создает еще и магнитное поле, которое действует только на движущиеся заряды*. Неподвижные заряды не создают магнитного поля и не подвержены действию магнитных полей.

2. Электрический ток есть направленное (т. е. небеспорядочное) движение зарядов, стало быть, вокруг любого провода, по которому протекает ток, возникает магнитное поле. С другой стороны, если провод с током поместить в магнитное поле, то на движущиеся в проводе электроны будут действовать магнитные силы, а так как электроны не могут выскочить из провода, то эти силы будут передаваться проводу.

3. Магнитные поля могут создаваться не только токами, но и магнитами. Объясняется это тем, что магнит, как и любое другое тело, состоит из атомов, в которых есть движущиеся электроны. Магнитные поля, созданные отдельными электронами, в большинстве случаев компенсируются (взаимно уничтожаются). Но в некоторых телах они не уничтожаются, а, наоборот, складываются. Такие тела и являются магнитами.

С другой стороны, если в магнитное поле поместить какое-либо тело, то на электроны, движущиеся в атомах

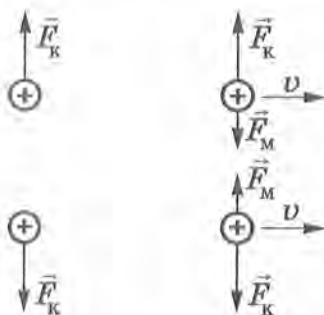


Рис. 117

этого тела, будут действовать магнитные силы. В большинстве веществ эти силы почти полностью компенсируются, но в некоторых веществах, например, в железе, такой компенсации не происходит, а так как электроны не могут выскочить из тела, то эти силы передаются ему.

§ 104. О направлении вектора магнитной индукции и силы Лоренца

1. В разных точках поле, созданное магнитом или проводом, по которому протекает ток, различно: вблизи магнита или провода с током оно «сильнее», чем в более далеких точках. Чтобы характеризовать поле в каждой данной точке, вводят векторную величину, которую когда-то называли «магнитной силой», а теперь — *магнитной индукцией* \vec{B} . О величине ее условились судить по силе, действующей на движущийся через данную точку электрический заряд. Эту силу назвали *силой Лоренца*. Для исследования этой силы можно использовать миниатюрную электронно-лучевую трубку, где пучок электронов разгоняется электрическим полем и попадает на экран, заставляя его светиться. Если поместить трубку в магнитное поле, например, между полюсами сильного магнита (рис. 118), то электронный луч заметно сместится. Куда смещается луч, туда и направлена сила Лоренца. Если взять трубку, где разгоняются не электроны, а положительные ионы (водорода, гелия, кислорода), то можно видеть, что отрицательные заряды отклоняются в сторону, обратную отклонению положительных зарядов.

2. Условимся о направлении вектора индукции магнитного поля. Для электрического поля подобный вопрос

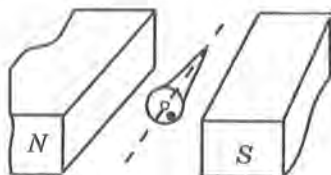


Рис. 118



Рис. 119

решался просто. За направление вектора напряженности электрического поля \vec{E} приняли направление силы, действующей на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку. Для магнитного поля так поступить нельзя, потому что направление силы Лоренца, как показывает опыт, зависит от направления скорости заряда (и получилось бы, что у вектора \vec{B} нет определенного направления).

Поворачивая трубку под разными углами, можно обнаружить, что *имеется одно направление, двигаясь вдоль которого заряд не испытывает действия силы* (в нашем примере это будет, если электроны летят от северного полюса к южному или наоборот). Это направление и примем за *направление вектора \vec{B}* . Но для полной однозначности надо из двух возможных направлений выбрать одно. Этот выбор условились делать с помощью правила левой руки. Это правило использует тот опытный факт, что сила Лоренца всегда перпендикулярна плоскости, образованной векторами \vec{v} и \vec{B} . Например, если заряд движется горизонтально и вектор \vec{B} горизонтален, то сила Лоренца будет направлена либо вертикально вверх, либо вертикально вниз.

Расположим ладонь левой руки так, чтобы вытянутые пальцы показывали направление скорости положительного заряда, а согнутый большой палец — направление силы (рис. 119). Будем считать (по определению), что вектор \vec{B} при этом «входит» в ладонь.

Часто приходится решать обратную задачу: зная направление \vec{v} и \vec{B} , определить направление силы Лоренца. Разумеется, для этого надо применить это же правило. Таким образом, *чтобы найти направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, надо концы пальцев левой руки направить вдоль скорости заряда, а ладонь расположить так, чтобы вектор \vec{B} входил в ладонь. Тогда отогнутый большой палец покажет направление силы.* Если движется отрицательный заряд, то можно сначала определить, куда действовала бы сила, если бы в этом направлении двигался положительный заряд, и потом учесть, что на отрицательный заряд сила действует в обратную сторону.

Поскольку ладонь в общем случае не обязательно располагается перпендикулярно вектору \vec{B} , во избежание ошибки при установке ладони можно поступить так: еще до применения правила левой руки определить оба возможных направления силы Лоренца, т. е. направление нормали к плоскости, образованной векторами \vec{v} и \vec{B} . Затем с помощью правила левой руки из двух противоположных направлений выбрать одно.

Упр. 1. Протон, который двигался на север, попал в магнитное поле, направленное вертикально вниз (за направление магнитного поля принимают направление вектора \vec{B}). Куда начнет «загибаться» траектория протона (если смотреть на него сверху): по часовой стрелке или против?

Упр. 2. Электрон, который двигался горизонтально на северо-восток, попал в магнитное поле, направленное на север. Куда направлена сила Лоренца, действующая на электрон?

О т в е т : Вертикально вниз.

Упр. 3. Электрон, который двигался горизонтально на юго-запад, попал в магнитное поле, направленное на восток. Куда направлена сила Лоренца, действующая на электрон?

О т в е т : Вертикально вниз.

Упр. 4. Вертикально расположенный медный стержень перемещают к югу. Определите направление силы Лоренца, действующей на свободные электроны этого стержня, если магнитное поле направлено на восток.

О т в е т: Вертикально вниз.

§ 105. Определение величины магнитной индукции и расчет силы Лоренца

1. Опыт показывает, что сила Лоренца зависит от величины движущегося заряда, от его скорости и от направления движения заряда:

$$F \sim qv \sin(\vec{v}, \vec{B}) \quad (1)$$

Отсюда следует, что если увеличить в несколько раз (например, втрое) величину заряда, то во столько же раз увеличится и сила Лоренца, отношение же

$$\frac{F}{qv \sin(\vec{v}, \vec{B})} \quad (2)$$

останется неизменным, если опыт проводился в одной и той же точке поля (созданного постоянными магнитами или постоянными токами). То же будет, если изменить не величину заряда, а его скорость или направление его движения. Таким образом, отношение (2) однозначно характеризует магнитное поле в данной точке. Эту величину и приняты за меру индукции магнитного поля:

$$\frac{F}{qv \sin(\vec{v}, \vec{B})} = B. \quad (3)$$

Отсюда видно, что *индукция магнитного поля численно равна максимальной силе, с которой поле действует на единичный заряд, проходящий через данную точку с единичной скоростью*. Единица индукции носит название тесла (Тл) в честь американского ученого Н. Тесла. Тесла — индукция такого поля, где на заряд в

1 Кл, движущийся со скоростью 1 м/с, действует максимальная сила в 1 Н.

Из формулы (3) следует, что сила Лоренца

$$F = qv \sin(\vec{v}, \vec{B}). \quad (4)$$

2. Следует иметь в виду, что, даже имея достаточный набор миниатюрных трубок с пучками электронов и ионов, мы вряд ли сумели бы непосредственно найти выражение для силы Лоренца. Дело в том, что фундаментальные законы природы (а к ним относится и выражение для силы Лоренца) далеко не всегда можно установить непосредственно опытом, их можно только угадать. Справедливость таких законов можно установить по тем следствиям, которые поддаются опытной проверке.

Типичным примером фундаментального закона может служить закон инерции (первый закон Ньютона). Никто не наблюдал и не мог наблюдать его «в чистом виде», поскольку невозможно создать такие условия, чтобы на данное тело не действовали другие тела. Этот закон является догадкой, гипотезой. В его правильности мы убеждены потому, что многочисленные следствия, выведенные на основе этого закона, подтверждаются на опыте. Если бы основные законы не требовали угадывания, их открывали бы на ранних этапах исследования, а их творцов мы не считали бы гениальными учеными.

§ 106. Линии магнитной индукции

1. Для того чтобы можно было изображать магнитное поле на чертежах, ввели понятие о линиях магнитной индукции. *Линией магнитной индукции назвали линию, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора \vec{B} в этой точке.* Эти линии не называют силовыми, так как на заряд, движущийся по направлению этих линий, сила не действует.

Чтобы быстро узнать форму линий индукции, можно использовать магнитные стрелки. Опыт показывает, что

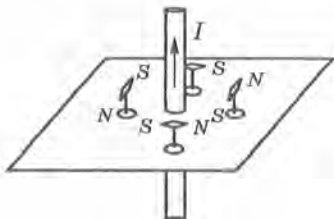


Рис. 120

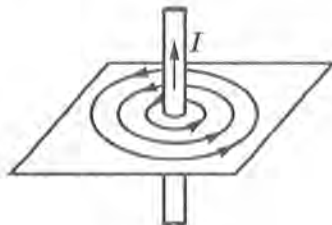


Рис. 121

магнитная стрелка устанавливается вдоль вектора \vec{B} , причем северный ее полюс указывает направление вектора \vec{B} . Роль крохотных стрелок могут играть железные опилки. В магнитном поле они намагничиваются и сцепляются друг с другом, образуя цепочки, расположенные вдоль линий индукции.

2. Помещая маленькие стрелки вокруг прямого провода с током (рис. 120), видим, что линии магнитной индукции имеют форму концентрических окружностей, центры которых лежат на оси провода (рис. 121). Направление этих линий определяется правилом правого кулака¹: если кулаком правой руки обхватить провод так, чтобы большой палец показывал направление тока (рис. 122), то остальные пальцы покажут направление силовых линий.

На рис. 123 показаны линии магнитной индукции витка с током. Виток можно представить как совокупность малых прямолинейных участков, поэтому направление линий индукции по-прежнему определяется правилом правого кулака. На рис. 124 показаны линии индукции соленоида (т. е. катушки). Чтобы определить направление линий индукции вокруг соленоида, можно условно представить, будто весь соленоид состоит из единственного витка, и к этому витку применять правило правого кулака. На рис. 125 показаны линии индукции постоянного маг-

¹ Иногда его называют правилом правого винта.

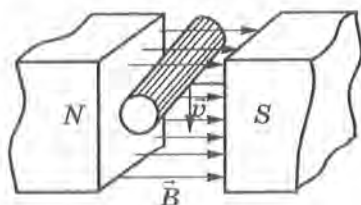


Рис. 128

двигаться горизонтально, если скорость электрона 30 000 км/с, напряжение между пластинами 15 000 В, а расстояние между пластинами 0,5 см?

О т в е т: 0,1 Тл.

Упр. 4. Медный стержень двигают с постоянной скоростью \vec{v} перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного

поля \vec{B} (рис. 128). Под действием силы Лоренца на одном конце стержня скопится избыток электронов, на другом появится их недостаток, и в стержне возникнет электрическое поле. Найдите напряженность этого поля.

У к а з а н и е. Рассмотрите условие равновесия свободного электрона внутри стержня.

О т в е т: $E = vB$.

Упр. 5. Под горизонтально расположенным проводом, который тянется с юга на север, поместили магнитную стрелку. Когда по проводу пустили ток, северный полюс стрелки стал показывать на запад. Определите направление тока в проводе.

Упр. 6. В одном прямом проводе ток течет на север, а в другом, расположенном под первым, — на восток. Куда направлен вектор магнитной индукции в точке, расположенной посередине между этими проводами?

§ 107. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

1. Рассмотрим, как будет двигаться заряженная частица (например, протон), влетающая в однородное магнитное поле перпендикулярно к линиям индукции (рис. 129). Поскольку сила Лоренца всегда перпендикулярна направлению скорости, она не в состоянии ни уве-

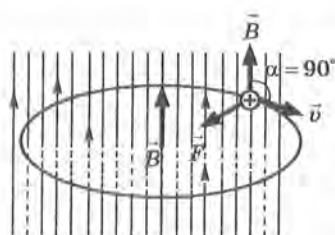


Рис. 129



Рис. 130

личить эту скорость, ни уменьшить, а будет только искривлять траекторию заряда. Кривизна траектории будет одинаковой во всех точках, так как во всех точках сила Лоренца остается одинаковой по модулю. Единственной плоской кривой, одинаково искривленной во всех точках, является окружность, значит, частица будет двигаться по окружности.

2. Рассчитаем радиус окружности, по которой будет двигаться протон массой m , влетевший со скоростью v перпендикулярно магнитному полю \vec{B} . На протон действует одна-единственная сила — сила Лоренца¹. Эту силу можно рассчитать двояко: по формуле Лоренца и по второму закону Ньютона:

$$q_0 v B = \frac{mv^2}{R} \rightarrow R = \frac{mv}{q_0 B}. \quad (5)$$

Период вращения (время одного оборота)

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{q_0 B} = \frac{2\pi m}{q_0 B}.$$

3. Действие магнитного поля на движущиеся заряды используется во многих электронных приборах. Например, вокруг кинескопа телевизора помещают две пары катушек. Одна пара создает поле, направленное горизонтально

¹ Как следует из *упр. 1* к § 106, даже в очень слабых магнитных полях сила Лоренца, действующая на протон или на электрон, в миллиарды раз больше силы их тяжести, так что силу тяжести в подобных задачах никогда не учитывают.

тально, другая — вертикально. При отсутствии поля электроны, вылетающие из горловины кинескопа, попадают в центр экрана, создавая там светящееся пятно. При включении одной пары катушек электроны отклоняются в вертикальном направлении, а при включении другой пары — в горизонтальном. Токи в катушках меняют так, чтобы электронный луч строчка за строчкой пробегал весь экран (за $\frac{1}{25}$ долю секунды), создавая на нем определенное изображение.

Из других приборов разберем устройство масс-спектрографа. Так называют прибор, позволяющий с высокой точностью измерять массы ионов разных веществ. На рис. 130 изображена упрощенная схема одного из масс-спектрографов. Вакуумная камера прибора помещена в магнитное поле (вектор индукции \vec{B} перпендикулярен плоскости чертежа и направлен из-за чертежа к нам). Положительные ионы исследуемого вещества разгоняются электрическим полем до определенной скорости и попадают в однородное магнитное поле. Там они движутся по дуге окружности и попадают на фотопластинку, оставляя на ней след. Зная заряд иона и радиус дуги, легко рассчитать массу иона.

Упр. 1. Протон (масса его m , а заряд q_0), первоначально покоившийся, пролетел сквозь разность потенциалов U и попал в магнитное поле \vec{B} , перпендикулярно к линиям магнитной индукции. Каков будет радиус окружности, по которой он начнет двигаться?

О т в е т: $\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q_0}}$.

§ 108. Сила, действующая на провод с током

Если провод с током поместить в магнитное поле, то на каждый свободный электрон начнет действовать сила Лоренца. Так как электроны не могут выскочить из прово-

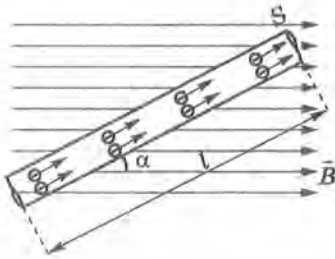


Рис. 131

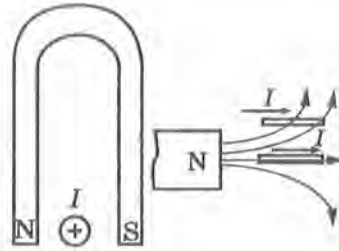


Рис. 132

да, то эта сила передается проводу. Рассчитаем, какая сила действует на прямолинейный участок провода длиной l , по которому протекает ток I ; угол между направлением тока и вектором \vec{B} равен α (рис. 131). Очевидно, искомая сила равна силе Лоренца, помноженной на число N свободных электронов этого участка

$$F = N \cdot q_0 v B \sin \alpha = Q v B \sin \alpha = Q \frac{l}{t} B \sin \alpha,$$

где Q — суммарный заряд всех электронов этого участка; $v = \frac{l}{t}$ — скорость упорядоченного движения электронов; t — время, за которое электрону, самому далекому от края S участка, надо пройти до этого края; за это же время весь заряд Q пройдет через сечение S , стало быть, $\frac{Q}{t}$ — это сила тока в участке. Окончательно имеем:

$$F = BIl \sin(\hat{lB}) \quad (6)$$

Это выражение называют законом Ампера. Направление силы Ампера, очевидно, определяется правилом левой руки: если концы пальцев показывают направление тока, а ладонь повернута так, чтобы линии индукции входили в ладонь (не обязательно под прямым углом), то отогнутый большой палец покажет направле-

ние силы. Эта сила всегда перпендикулярна плоскости, образованной проводом l и вектором \vec{B} .

Упр. 1. Определите направление силы, действующей на каждый из проводов, показанных на рис. 132.

Упр. 2. По двум параллельным проводам протекают токи одинакового направления. Определите, будут ли притягиваться друг к другу или отталкиваться.

Упр. 3. В одной плоскости с длинным прямым проводом, по которому протекает ток, поместили жесткую рамку квадратной формы так, что две стороны рамки параллельны проводу (и находятся в одной плоскости с ним). По рамке протекает ток, причем в ближайшей к проводу стороне рамки ток сонаправлен с током в проводе. Найдите направление силы, действующей на каждую сторону рамки, и определите, куда она начнет двигаться.

Упр. 4. Горизонтальные рельсы находятся на расстоянии 0,3 м друг от друга. На них лежит перпендикулярно к рельсам стержень массой 0,6 кг. Магнитное поле $B = 0,1$ Тл направлено параллельно рельсам. Какой ток надо пропустить через стержень, чтобы он подпрыгнул?

О т в е т: 200 А.

Упр. 5. Горизонтальные рельсы находятся на расстоянии 0,3 м друг от друга. На них лежит перпендикулярно к рельсам стержень массой 0,6 кг. Магнитное поле $B = 0,1$ Тл направлено вертикально вниз. Какой величины ток надо пустить через стержень, чтобы он начал двигаться, если коэффициент трения $\mu = 0,27$?

О т в е т: 40 А.

Упр. 6. В однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} поместили прямой провод под углом α к линиям индукции. Удельное сопротивление материала, из которого сделан провод, равно ρ , а площадь сечения S . К концам провода подвели напряжение U . Найти силу, с которой магнитное поле действует на провод.

О т в е т: $\frac{UBS \sin \alpha}{\rho}$.

§ 109. Рамка с током в магнитном поле

1. Рассмотрим действие магнитного поля на рамку (т. е. на жесткий виток, чаще всего прямоугольной формы), по которой протекает постоянный ток I . Магнитное поле \vec{B} будем считать однородным. Сначала рассмотрим частный случай, когда нормаль к плоскости рамки перпендикулярна направлению вектора \vec{B} (рис. 133). Применяя правило левой руки, видим, что на левый провод действует вертикальная сила, направленная вверх (\vec{F}_1), на правый — вниз (\vec{F}_2), а на боковые стороны силы не действуют. Силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 равны друг другу по модулю

$$F_1 = F_2 = BIl_2$$

и стремятся повернуть рамку вокруг оси OO' по часовой стрелке.

Теперь рассмотрим более общий случай, когда нормаль к рамке n составляет угол φ с направлением вектора \vec{B} (рис. 134; здесь рамка показана в разрезе). Несмотря на то, что силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 не изменились по величине (так как угол между направлением тока и магнитным полем по-прежнему равен 90°), их «вращающее действие» уменьшилось. Повернуть рамку вокруг оси стремятся только составляющие сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , направленные перпендикулярно плоскости рамки, которые обозначены на ри-

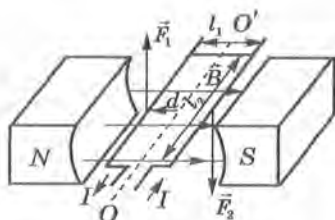


Рис. 133

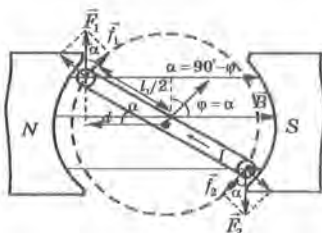


Рис. 134

сунке как \vec{f}_1 и \vec{f}_2 . Величины этих составляющих одинаковы и равны:

$$f_1 = f_2 = F_1 \cdot \cos \alpha = BIl_2 \cos \alpha = BIl_2 \sin \varphi,$$

Оставшиеся составляющие сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 и силы, действующие на две другие стороны рамки, стремятся ее деформировать, но не вращать. В частном случае $\varphi = 0$ (рамка расположена перпендикулярно вектору \vec{B}) возникает положение равновесия, так как $\sin \varphi = 0$ и, следовательно, составляющие \vec{f}_1 и \vec{f}_2 отсутствуют.

2. На рассмотренном примере поведения рамки с током в магнитном поле обсудим действие сил на способное вращаться вокруг неподвижной оси твердое тело в общем случае. Результат действия силы на такое тело зависит не только от ее величины («чем сильнее толкать, тем быстрее закрутится»), но и от расстояния от оси вращения до линии, вдоль которой действует сила «плеча». На рис. 133 и 134 плечо силы \vec{F}_1 обозначено через d и равно:

$$d = \frac{l_1}{2} \cdot \cos \alpha = \frac{l_1}{2} \cdot \sin \varphi,$$

В случае, изображенном на рис. 133, $\sin \varphi = 1$, плечи сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 максимальны, максимально и вращающее действие этих сил на рамку. При повороте рамки на 90° синус угла обращается в 0, плечи сил тоже нулевые, вращающее действие сил исчезает. Таким образом, мы приходим к выводу, что увеличение плеча силы увеличивает ее вращающее действие («чем больше плечо, тем легче крутить»).

Сделанный нами вывод может быть строго получен из законов Ньютона. Он хорошо известен нам из повседневной практики: чтобы было легче открыть дверь, ручки стараются прикреплять подале от петель — оси вращения двери; для того, чтобы отвернуть сильно затянутую гайку, опытные работники выбирают гаечные ключи с длинными ручками. Известное вам с 7 класса правило рычага тоже является следствием сделанного утверждения.

3. Для количественной характеристики вращающего действия силы на тело с осью вращения вводят специальную величину — *момент силы*, который равен произведению силы на плечо:

$$M = F \cdot d.$$

Если имеется несколько сил, стремящихся повернуть тело вокруг оси в одном направлении, их моменты складываются; если действие сил противоположно — вычитаются. Способное вращаться вокруг неподвижной оси тело остается неподвижным в случае, если сумма моментов приложенных к нему сил равна 0. (Более подробно эти вопросы рассмотрены в Приложении.)

В рассмотренном нами случае рамки с током в магнитном поле моменты сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 одинаковы и равны

$$M_1 = M_2 = BIl_2 \cdot d = BIl_2 \frac{l_1}{2} \cdot \sin \varphi.$$

Полный вращающий момент, действующий на рамку со стороны пары сил:

$$M = M_1 + M_2 = BIl_1 \cdot l_2 \cdot \sin \varphi = BIS \cdot \sin \varphi,$$

где S — площадь рамки.

При расчете мы считали рамку прямоугольной, но выведенная формула справедлива для рамки любой другой формы.

Упр. 1. На рис. 135 изображен виток, имеющий форму бублика (геометрическая фигура такой формы носит название «тор»). Начертите вид витка сверху, сбоку и разрез витка по сечению OO' . Покажите на разрезе направление тока в точках A, B, C .

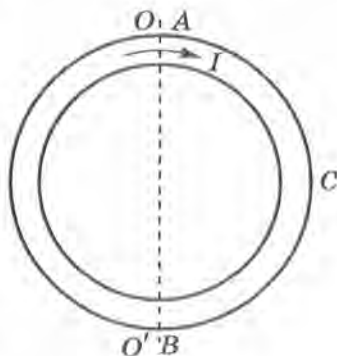


Рис. 135

Упр. 2. Как можно было бы определить единицу магнитной индукции на основе формул (6) и (7)?

О т в е т: Тесла — индукция такого поля, где:

а) на провод длиной 1 м с током 1 А действует максимальная сила в 1 Н; б) на рамку площадью 1 м² с током 1 А действует максимальный вращающий момент 1 Н · м.

Упр. 3. Как можно было бы условиться о направлении вектора \vec{B} на основе формул (6) и (7)?

О т в е т: а) То направление провода, при котором сила перестает на него действовать (для устранения двойственности надо еще использовать правило левой руки); б) направление нормали к рамке при ее устойчивом равновесии (для устранения двойственности надо выбрать то направление нормали, которое связано с направлением тока правилом правого кулака).

§ 110. Использование в технике сил, действующих на токи

1. Важнейшим примером использования сил, с которыми магнитное поле действует на токи, являются электродвигатели. Простейшая модель двигателя постоянного тока показана на рис. 136. Она состоит из магнита, в поле которого находится рамка, и из переключающего устройства (коллектора). Если к неподвижным контактам 1 и 2 (их называют «щетками») подать постоянное напряжение, то по рамке пойдет ток и она начнет поворачиваться. Когда рамка дойдет до такого положения, что нормаль к ней совпадет с направлением поля, вращающий момент обратится в нуль. Это положение рамка может проскочить «по инерции», но после этого надо, чтобы направление сил, действующих на провода A и B , изменилось на противоположное (иначе вращающий момент вернет рамку в положение устойчивого равновесия). Для этого надо каждые пол-оборота менять направление тока в рамке. Это автоматически предельывает коллектор.

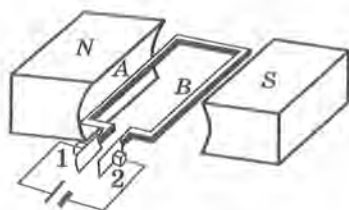


Рис. 136

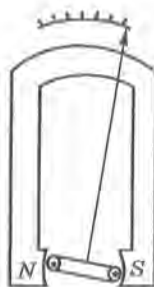


Рис. 137

В нашей модели он состоит из двух полуколец, вращающихся вместе с рамкой, и из неподвижных щеток, прижимающихся к полукольцам. Из рисунка видно, что каждые пол-оборота направление тока в проводах *A* и *B* меняется, так что каждый провод поочередно движется то вверх, то вниз, и рамка непрерывно вращается. Разумеется, настоящий двигатель сложнее этой модели, и в нем никаких «мертвых точек» не возникает.

Двигатели постоянного тока используются в трамваях, троллейбусах, в автомашинах (стартеры), на подъемных кранах. На заводах используются почти исключительно двигатели переменного тока. Они устроены иначе, чем двигатели постоянного тока, но и у них вращающий момент возникает благодаря действию магнитного поля на провод с током. Электродвигатели являются основными потребителями электроэнергии в промышленно развитых странах (в нашей стране они потребляют 70% всей производимой электроэнергии).

2. Другим примером использования сил, действующих на токи, могут служить электроизмерительные приборы. Основной частью большинства лабораторных вольтметров и амперметров является прибор, называемый *гальванометром*. Он состоит из постоянного магнита, в поле которого расположена катушка (на рис. 137 условно показана катушка, состоящая из одного витка).

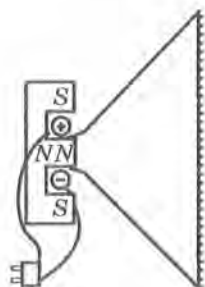


Рис. 138

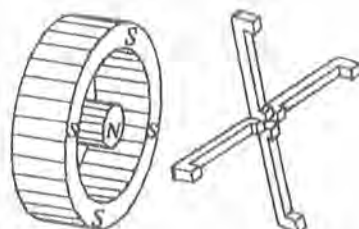


Рис. 139

Катушка удерживается в положении равновесия с помощью пружинок (не показанных на чертеже). При пропускании тока на катушку начинает действовать вращающий момент, и она поворачивается, преодолевая сопротивление пружинок. Чем больше ток, тем больше угол поворота катушки. Стрелка, прикрепленная к катушке, делает этот поворот легко измеримым. Прибор такой конструкции называют *магнитоэлектрическим*.

Если такой прибор включить параллельно какой-нибудь цепи, то напряжение на приборе будет равно напряжению цепи, т. е. прибор может служить вольтметром. Если его включить последовательно в цепь, то ток в приборе будет равен току в цепи, и он может служить амперметром. Но обычно перед тем, как использовать прибор в качестве вольтметра, последовательно с ним включают добавочный резистор, а перед тем, как использовать в качестве амперметра, параллельно прибору включают шунт (см. § 94).

3. В качестве последнего примера использования силы Ампера рассмотрим устройство современного *громкоговорителя*. Основной его частью является сильный кольцевой магнит, в поле которого расположена легкая катушка (рис. 138). Для простоты показана катушка, состоящая из одного витка. Устройство кольцевого магнита показано на рис. 139 (для наглядности можно представить, что он собран из подковообразных магнитов, как показано справа).

Если через катушку пропускать ток, на нее будет действовать сила Ампера. Применяв правило левой руки, видим, что как верхняя, так и нижняя часть катушки сместятся в одну и ту же сторону (определите сами, куда). Если изменить направление тока, то изменится и направление смещения катушки. При пропускании через катушку переменного тока определенной частоты она будет колебаться с такой же частотой. Эти колебания передаются диффузору, т. е. большой мембране из мягкого материала (например, просто бумаги), которая может возбуждать более мощные звуковые волны, чем катушка.

§ 111. Магнитный поток

1. Для формулировки некоторых законов электромагнетизма удобно ввести понятие о магнитном потоке. *Магнитным потоком Φ , пронизывающим данную площадку, называют произведение нормальной проекции вектора магнитной индукции на площадь площадки:*

$$\Phi = B_n S = BS \cos(\vec{n}, \vec{B}).$$

Один и тот же магнитный поток можно получить, выбрав маленькую площадку вблизи от магнита или большую площадку далеко от него (рис. 140). В первом случае площадь мала, зато поле сильное, во втором — слабое поле, зато велика выбранная площадь.

Единица магнитного потока — вебер. $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$, т. е. вебер — это магнитный поток, созданный однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл на площади 1 м^2 , расположенной перпендикулярно вектору магнитной индукции.

2. Если условиться чертить линии магнитной индукции так, чтобы их густота соответствовала индукции поля в данном месте (под густотой будем подразумевать число линий индукции, пронизывающих единичную площадку, нормальную к линиям), то магнитный поток, пронизывающий данную площадку, будет равен полному

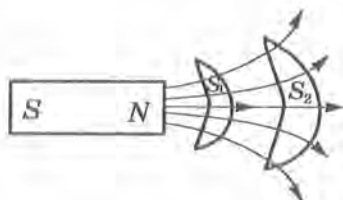


Рис. 140

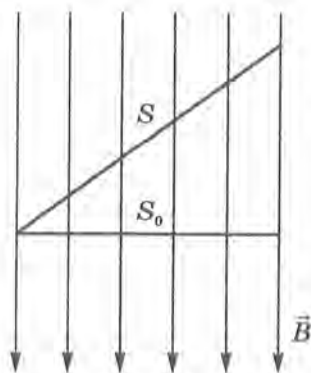


Рис. 141

числу линий индукции, пронизывающих ее. Если площадка нормальна к линиям индукции, то это очевидно (например, если $B = 3$ Тл, $S = 5$ м², то полное число линий индукции, пронизывающих данную площадку, равно 15, т. е. равно Φ). Нетрудно доказать это и в общем случае.

Упр. 1. Пользуясь определением термина «магнитный поток», докажите, что магнитный поток, пронизывающий данную площадку S (рис. 141), равен магнитному потоку, пронизывающему проекцию этой площадки S_0 на плоскость, перпендикулярную линиям индукции.

Упр. 2. Однородное магнитное поле направлено вертикально вниз. Начертите положение рамки (вид сбоку), когда магнитный поток, пронизывающий ее: а) максимален; б) вдвое меньше максимального; в) равен нулю.

§ 112. Вещество в магнитном поле

1. Пусть катушка, по которой протекал определенный ток, сначала находилась в вакууме. Если теперь ее поместить в воздух, в воду или в другую среду, то магнитное поле во всех точках изменится. В одних средах оно слегка

(на долю процента) увеличивается, в других — слегка уменьшается, а в некоторых веществах увеличивается в сотни и тысячи раз¹. Первую группу веществ (где магнитное поле слегка увеличивается) называют *парамагнитными*, вторую — *диамагнитными*, а последнюю — *ферромагнитными*, так как самым важным представителем таких веществ является железо («феррум»).

Поскольку для магнитного поля (как и для электрического) справедлив принцип суперпозиции, очевидно, что первоначальное поле \vec{B}_0 катушки не изменилось оттого, что возле нее оказалось данное вещество, но к нему добавилось поле \vec{B}_1 , созданное атомами вещества. Результирующее поле \vec{B} является векторной суммой этих двух полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1.$$

Отношение индукции поля в данном веществе к индукции поля, созданного только катушкой, называется *магнитной проницаемостью данного вещества*:

$$\mu = \frac{|\vec{B}|}{|\vec{B}_0|}.$$

У парамагнитных веществ эта величина слегка больше единицы, у диамагнитных — слегка меньше, а у ферромагнитных — во много раз больше единицы (причем для ферромагнитных веществ μ не является величиной постоянной, а зависит от величины B_0).

В качестве примера приведем несколько цифр. У алюминия магнитная проницаемость равна 1,000 023, у воздуха — 1,000 013, у воды — 0,999 991, у меди — 0,999 912.

¹ Здесь, как и в случае электрического поля в диэлектрике, речь идет о макроскопическом, усредненном поле. Микроскопическое магнитное поле может сильно меняться при переходе от одних точек к соседним.

§ 113. Связь магнитных свойств вещества с внутриатомными токами

1. Еще в начале XIX века французский физик Ампер предположил, что магнитные свойства вещества объясняются замкнутыми токами, протекающими внутри атомов. В настоящее время эту гипотезу можно считать подтвержденной. Согласно упрощенной модели электрон в атоме можно представлять в виде крохотного заряженного шарика, который движется по определенной орбите вокруг ядра, а также вращается вокруг собственной оси. Каждое из этих двух движений равносильно замкнутому току. Вращение электрона вокруг своей оси называют спином (от английского *spin* — вращение, кручение). В соответствии с этим различают орбитальное и спиновое магнитное поле.

2. Во многих случаях результирующее магнитное поле атома (в отсутствие внешнего магнитного поля) равно нулю. Такие вещества являются диамагнитными. При наличии внешнего поля движение по орбитам меняется так, что появляется поле, направленное наперекор внешнему.

Если результирующее магнитное поле атома не равно нулю, то такие вещества являются обычно парамагнитными. При отсутствии внешнего поля атомы парамагнетика ориентированы хаотически, и результирующее поле в веществе равно нулю. Во внешнем поле атомы поворачиваются так, что их поля складываются и усиливают внешнее поле. Тепловое движение мешает этому, и при выключении внешнего поля ориентация атомов снова становится хаотической.

3. Рассмотрим более подробно строение ферромагнитных веществ. Исследования показали, что любой ферромагнетик состоит из огромного количества областей, содержащих по несколько миллиардов атомов. Каждая такая область является крохотным магнитиком, намагниченным до насыщения, и называется *доменом*. Размеры

доменов колеблются от одной тысячной до одной сотой доли миллиметра, так что в каждом монокристаллике может быть несколько доменов. В ненамагниченном куске ферромагнетика магнитные поля отдельных доменов компенсируются, так что результирующее поле равно нулю (рис. 145). Если создать внешнее магнит-

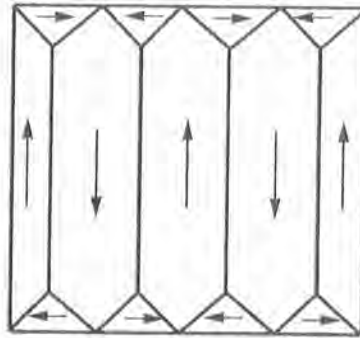


Рис. 145

ное поле, то те домены, у которых направление магнитного поля близко к направлению внешнего поля, начнут «поедать» своих соседей. При дальнейшем увеличении внешнего поля начинает поворачиваться направление магнитного поля доменов (во всех атомах данного домена поворот на определенный угол происходит одновременно). Когда направление поля всех доменов совпадает с направлением внешнего поля, наступает насыщение.

4. Причиной возникновения магнитного поля доменов являются спиновые поля электронов. В каждом атоме ферромагнитного вещества есть несколько электронов, спиновые поля которых не уничтожаются друг другом, а, наоборот, складываются. Между электронами разных атомов возникает такое взаимодействие, что спиновые поля нескольких миллиардов атомов стремятся принять одинаковое направление и в результате складываются. Такая совокупность атомов и является доменом.

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 114. Природа тока в металлах

1. Опыты показывают, что ток в металлах не связан с перемещением атомов. Например, когда ток идет из медного провода в алюминиевый, то не происходит перехода атомов меди в алюминий или атомов алюминия в медь. В одном из опытов ток в подобной цепи поддерживался в течение года.

Тщательные исследования показали, что никаких химических изменений в проводах не произошло (сверх незначительной диффузии атомов, происходящей и при отсутствии тока). Если считать, что носителями тока в металле могут быть либо атомы, либо электроны, то эти опыты надо считать свидетельством того, что носителями тока в металлах являются электроны. Таким образом, надо признать, что в металлах часть атомных электронов отрывается от атомов и способна перемещаться независимо от них. Эти электроны называют свободными.

Таким образом, *любой металл состоит из ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки, и свободных электронов, беспорядочно движущихся между ионами* (рис. 75). Число свободных электронов огромно — по порядку величины их концентрация (т. е. число их на единицу объема) такая же, как и концентрация атомов. Этим объясняется хорошая электропроводность металлов.

2. Если создать поле, направленное вдоль проводника, то свободные электроны, не прекращая беспорядочного движения, получают добавочную скорость, направленную вдоль проводника. Их движение слегка напоминает движение роя мошек, сносимого ветром.

Если бы электроны двигались в вакууме, то их скорость направленного движения непрерывно росла бы. Но

в металлах они сталкиваются с ионами, отдавая им накопленную энергию. После столкновения с ионами электроны разлетаются беспорядочно, так что скорость их направленного движения, в среднем, обращается в нуль. Затем они снова разгоняются электрическим полем, снова тормозятся ионами и т. д. Таким образом, максимальная, а стало быть, и средняя скорость направленного движения оказывается ограниченной.



Рис. 146

3. Расчет показывает, что средняя скорость направленного движения в проводниках очень мала (порядка 0,001 мм/с, что в миллионы раз меньше их скорости беспорядочного движения). Этому не противоречит тот факт, что при замыкании даже длинной электрической цепи (например, телефонной линии длиной в несколько километров) ток во всех участках возникает практически одновременно. Дело в том, что скорость электронов вовсе не совпадает со скоростью распространения сигнала. Если источник тока подключить с двух концов к длинной линии (рис. 146), то вдоль проводов со скоростью света ($c = 300\,000$ км/с в вакууме) начнет распространяться электрическое поле. Электроны участок за участком начнут приходить в движение, так что участок за участком будет возникать и магнитное поле. Если бы длина линии была 300 000 км, то уже через одну секунду по всей длине линии возник бы ток. В коротких линиях ток во всех участках начинается практически одновременно.

§ 115. Связь силы тока со скоростью движения зарядов

1. Чем больше скорость направленного движения свободных электронов, тем больший заряд проходит в еди-

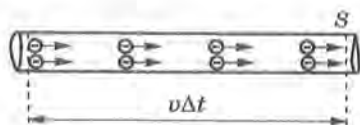


Рис. 147

ницу времени через данное сечение. Выведем точную формулу, связывающую эти величины. Докажем, что

$$I = q_0 n v S,$$

где q_0 — заряд электрона, n — концентрация свободных электронов (их число в единице объема), S — площадь поперечного сечения проводника, v — средняя скорость направленного движения электронов.

Для вывода формулы рассчитаем, какой заряд Δq подойдет к данному сечению S за время Δt , и найдем силу тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$. За время Δt к данному сечению успеют подой-

ти электроны, отстоящие на расстояние $v\Delta t$ от него (рис. 147), а также все более близкие электроны. Суммарный заряд этих электронов равен произведению заряда одного электрона на их число в объеме $Sv\Delta t$, т. е. $\Delta q = -q_0 n Sv\Delta t$. Разделив обе части этого выражения на Δt , получим искомую формулу.

2. Выведенная формула, очевидно, применима не только к металлам, но и к любым проводникам. В общем случае q_0 может означать не заряд электрона, а заряд другой свободной частицы (например, иона).

Упр. 1. Рассчитайте концентрацию свободных электронов (их число в 1 м^3) в меди, если считать, что на каждый атом меди приходится два свободных электрона. Атомная масса меди $m_r = 64$ а. е. м. (атомных единиц массы), плотность меди $\rho = 8,9 \text{ кг/м}^3$.

У к а з а н и е. Число свободных электронов в одном моле надо поделить на объем моля.

О т в е т: $8,3 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3$.

Упр. 2. Определите среднюю скорость направленного движения электронов в медном проводе с площадью сече-

ния в 1 мм^2 , по которому протекает ток 16 А . Использовать ответ к предыдущему упражнению.

О т в е т: $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм/с}$.

Упр. 3. Пусть разность потенциалов между двумя точками данного участка цепи удвоилась. Как изменится: а) напряженность поля в участке; б) ускорение направленного движения электронов; в) средняя скорость направленного движения; г) ток в цепи?

§ 116. Зависимость сопротивления металлов от температуры

1. Опыт показывает, что с повышением температуры сопротивление металлов увеличивается. Это вовсе не связано с изменением размеров проводника при нагреве. Если нагреть проволоку из чистого металла на две-три сотни градусов, то ее сопротивление удвоится, хотя геометрические размеры проволоки увеличатся менее чем на 1%. Таким образом, при изменении температуры меняется удельное сопротивление металлов.

2. Зависимость сопротивления металлов от температуры используется в термометрах сопротивления. Основной частью его служит платиновая проволока, намотанная на керамический корпус. Провод помещают в среду, температуру которой надо определить. Измерив ее сопротивление, тем самым узнают температуру среды (ясно, что заранее термометр должен быть проградуирован). Такие термометры более точны, чем ртутные (позволяют измерять температуру с точностью до тысячных долей градуса). Кроме того, они позволяют измерять температуры в более широких интервалах, чем жидкостные термометры. В последнее время наибольшее распространение получили не металлические, а полупроводниковые термометры сопротивления.

3. У сплавов при изменении температуры сопротивление меняется значительно меньше, чем у чистых метал-

лов. У некоторых сплавов (константана, манганина) оно практически неизменно. Из таких сплавов изготавливают эталонные сопротивления и различные измерительные приборы.

§ 117. Сверхпроводимость

1. В начале XX века было обнаружено (в 1911 г. голландским ученым Камерлинг-Оннесом), что при температурах, близких к абсолютному нулю, сопротивление некоторых веществ скачком падает до нуля (рис. 148). Это явление назвали сверхпроводимостью. Ток, возбужденный в кольце из сверхпроводника, может продолжаться месяцы и годы, не затухая после того, как источник убрали.

Примерно половина чистых металлов может переходить в сверхпроводящее состояние, а всего в настоящее время известно более тысячи сверхпроводников. Из чистых металлов наибольшей температурой перехода обладает ниобий (9,3 К), а у сплавов «рекордсменом» является соединение ниобия с германием (23,2 К).

2. В сильном магнитном поле сверхпроводимость исчезает. Чем дальше отстоит температура сверхпроводника от точки перехода, тем сильнее должно быть разрушающее магнитное поле. Таким разрушающим магнитным полем может быть и поле самого тока в сверхпроводнике. У некоторых сплавов удается сохранять сверхпроводимость при токе в несколько тысяч ампер.

3. До сих пор неизвестно, можно ли создать сверхпроводящие материалы при температурах, близких к комнатным. Создание таких материалов позволило бы передавать электроэнергию на любые расстояния без потерь. Однако уже те-

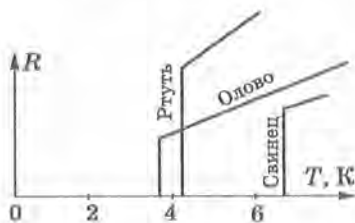


Рис. 148

перь электромагниты со сверхпроводящими обмотками, охлажденными жидким гелием (температура кипения 4,2 К), часто используют в ускорителях элементарных частиц, в мощных генераторах тока и в некоторых других устройствах. Большое практическое значение имело бы создание материалов, способных сохранять сверхпроводящее состояние при температуре кипения легкодоступного и дешевого жидкого азота 77 К.

4. В 1986 г. был открыт новый класс высокотемпературных сверхпроводников — керамики на основе смеси окислов некоторых металлов, и «температурные рекорды» продвигаются вверх с каждым годом, достигнув сейчас температур выше 120 К. При температурах выше точки перехода в сверхпроводящее состояние эти материалы представляют собой не металлы, а полупроводники. К сожалению, пока не удается сделать эти материалы достаточно технологичными и стабильно работающими, чтобы обеспечить их широкое практическое применение.

§ 118. Природа тока в собственном полупроводнике

1. *Полупроводниками называют вещества, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами.* Хотя полупроводниками являются очень многие вещества (окислы, сульфиды и некоторые химические элементы), свои ценные качества они проявляют лишь в материалах необычайной химической чистоты, когда на много миллиардов атомов приходится не более одного атома примеси. Самыми важными из применяемых в настоящее время полупроводников являются кремний и германий. Природу тока в полупроводнике, не содержащем примесей, разберем на примере кремния.

2. В кристалле кремния каждый атом связан с четырьмя соседними атомами ковалентными связями. Ковалентная связь с каждым соседом осуществляется путем образования пары электронов, принадлежащих обоим свя-

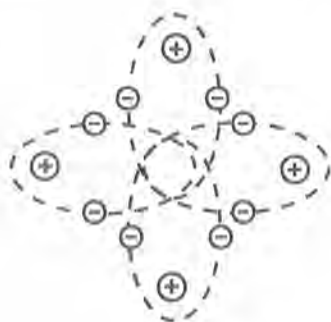


Рис. 149

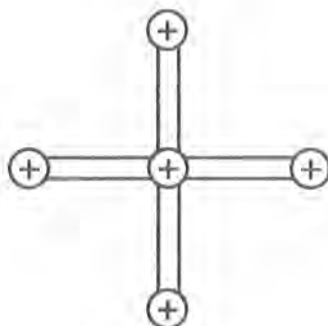


Рис. 150

занным атомам. Каждый атом кремния имеет четыре валентных электрона, так что для ковалентной связи с каждым соседом выделяется по одному электрону, а второй электрон выделяет сосед. Это условно показано на рис. 149 и 150.

Если все валентные электроны заняты в межатомных связях, то свободных электронов в кристалле нет. Такое тело является *идеальным изолятором*. Но такое состояние было бы возможно только при абсолютном нуле ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). С повышением температуры возрастает амплитуда колебаний атомов кристалла, и в некоторых атомах энергии этих колебаний может хватить для отрыва электронов от атомов. Возникшие свободные электроны могут перемещаться между узлами кристаллической решетки, подобно свободным электронам в металле. Чем выше температура, тем больше свободных электронов и тем больше проводимость полупроводника.

3. В том атоме, откуда вырван электрон, возникает нехватка одного электрона. Такое состояние называют *дыркой*. Наличие дырки создает дополнительную возможность перемещения электронов, так как в дырку, как показывает теория, может «прыгнуть» электрон из любого соседнего атома. Если кристалл находится в электрическом поле, то такие прыжки будут происходить преимущественно в направлении действия поля.

щественно вдоль силовых линий. Электроны будут последовательно перескакивать от одного атома к другому, а дырка будет как «по эстафете» перемещаться в обратную сторону (рис. 151). Направление возникшего тока совпадает с направлением движения дырки, стало быть, *дырка ведет*

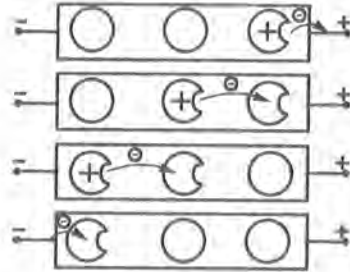


Рис. 151

себя как положительный заряд, равный заряду электрона. Следить за движением дырки много легче, чем следить за последовательными прыжками цепочки электронов. Аналогично, описывая движение воды в стакане, нам проще сказать: пузырек воздуха (т. е. «дырка» в воде) поднялся вверх, чем подробно описывать движение отдельных частиц воды, поочередно заполнявших эту дырку. Поэтому, хотя во всех случаях ток осуществляется движением электронов, в одних случаях (когда электроны движутся в пространстве между узлами решетки) мы будем говорить о движении электронов, в других (когда электроны перескакивают с атома на атом) — о движении дырок.

4. В чистом полупроводнике число электронов равно числу дырок. Хотя при данной температуре число таких пар является постоянным, это равновесие не является статическим. Иногда дырку может заполнить не электрон, перескочивший из соседнего атома, а свободный электрон. В этом случае сразу исчезнут оба свободных заряда (дырка и электрон). Такой процесс называют *рекомбинацией*. Если температура поддерживается постоянной, то число вновь рождающихся пар равно числу рекомбинировавших пар, так что общее число пар в кристалле остается постоянным. При комнатной температуре число это крайне мало (например, в кристалле кремния одна пара свободных зарядов приходится на

несколько сот миллиардов атомов). *Проводимость, возникающая в чистом полупроводнике, называется собственной.* Характерная особенность собственной проводимости — ее быстрый рост с увеличением температуры (в противоположность металлам, у которых проводимость с ростом температуры падает).

§ 119. Применение термо- и фоторезисторов

1. Приборы, использующие зависимость сопротивления полупроводников от температуры, называют *терморезисторами*. Приведем некоторые примеры их применения:

а) измерение температуры. Если последовательно с источником тока и гальванометром включить терморезистор, то по силе тока можно судить о температуре резистора, а стало быть, и о температуре тела, с которым он соприкасается;

б) обнаружение удаленных тел по их тепловому излучению. Чувствительность терморезисторов, включенных в соответствующую электронную схему, такова, что, будучи помещенными в фокус вогнутого зеркала, они способны издали обнаруживать тепловое излучение самолетов, ракет и других тел (например, запуск мощной ракеты удастся обнаружить со спутника за тысячу километров и более). Такие устройства используются в военной технике для обнаружения целей и для автоматической наводки противосамолетных ракет на цель.

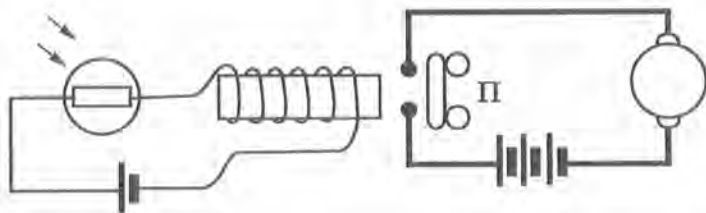


Рис. 152

2. Сопротивление некоторых полупроводников сильно зависит от освещения. Это объясняется тем, что энергия, необходимая для вырывания валентных электронов из межатомных связей, может быть получена не в результате нагрева кристалла, а от света, падающего на полупроводник. Появление свободных зарядов под действием света называют **внутренним фотоэффектом**, а полупроводниковые приборы, где это явление используется, — **фоторезисторами**.

Часто бывает, что ток, возникающий в фоторезисторе, недостаточен для приведения в действие нужного прибора (например, электродвигателя, который должен включаться при попадании света на фоторезистор). В подобных случаях используют фотореле. Действие его ясно из рис. 152 (на рисунке не показана пружина, которая отводит пластинку II от электромагнита, как только на фоторезистор перестает попадать свет).

Примеры применения фотореле: фотореле может считать стандартные детали, движущиеся по конвейеру. С одной стороны конвейера устанавливают источник света, а с другой — фотореле. Когда изделие заслоняет луч света, фотореле срабатывает, и соединенный с ним счетчик делает отчет. Сходным образом работает фотореле, запирающее проход в метро после каждого прошедшего мимо пассажира.

Фотореле используют для пожарной сигнализации. При появлении дыма (например, в трюме корабля, где хранится хлопок) воздух становится менее прозрачным, фотореле срабатывает и включает сигнал тревоги или огнетушитель.

Упр. 1. Расскажите, как работает фотореле. (Начать можно так: «Пусть фоторезистор находится в темноте...»)

Упр. 2. Начертите две схемы фотореле. В одной схеме пусть электродвигатель включается, когда фоторезистор освещают, а в другой — когда его перестают освещать.

§ 120. Примесная проводимость

1. Введение примеси даже в ничтожной концентрации (1 атом на 10 миллионов) может резко увеличить электропроводность полупроводника. Рассмотрим случай, когда в кристалл кремния включен атом пятивалентного элемента, например, мышьяка. Такой примесный атом займет один из узлов решетки, где нормально должен быть атом кремния. Из пяти валентных электронов атома мышьяка только четыре будут участвовать в образовании ковалентных межатомных связей (рис. 153). Пятый электрон связан только со своим атомом. Связь оказывается настолько слабой, что этот электрон отрывается при сравнительно низких температурах (ниже комнатной). Таким образом, примесный атом порождает свободный электрон, но дырка при этом не возникает (можно, впрочем, сказать, что дырка возникла, но она привязана к своему месту и никак не влияет на проводимость кристалла). В таком кристалле будет мало дырок, но много свободных электронов. *Примеси, отдающие электроны, называют донорами, а кристалл, где электронов много больше, чем дырок, — полупроводником n-типа, или электронным* (от латинского *donare* — дарить; *negativus* — отрицательный).

2. Если в кристалл кремния включить атом трехвалентного вещества (бора, алюминия, индия), то для образования новой ковалентной связи не хватит одного электрона (рис. 154). Атом такой примеси легко захватывает электрон от одного из соседей, превращаясь в отрицательный ион. В соседнем атоме (откуда похищен электрон) возникает дырка. В таком кристалле будет мало свободных электронов, зато много дырок. *Примеси, захватывающие электроны, называют акцепторами, а полупроводник с такой примесью — полупроводником p-типа, или дырочным* (лат. *acceptare* — принимать, *positivus* — положительный).

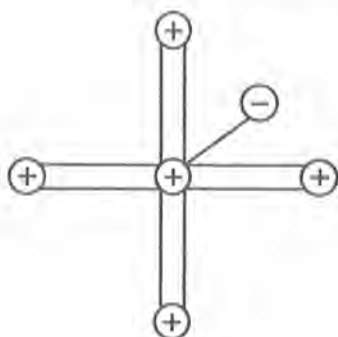


Рис. 153

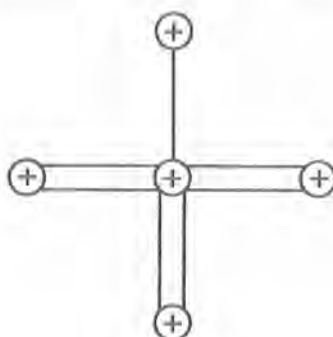


Рис. 154

3. Даже при концентрации примеси 1 : 1 000 000 число созданных ими свободных зарядов во много тысяч раз больше, чем в чистом кристалле. Заряды, концентрация которых является преобладающей (они почти целиком поставляются примесными атомами), называют *основными носителями*, а заряды противоположного знака — *неосновными*. В полупроводнике *n*-типа основными носителями являются электроны, а в полупроводнике *p*-типа — дырки.

§ 121. Электронно-дырочный переход

1. Наиболее важные применения полупроводников (а именно: выпрямление и усиление тока) связаны с особыми свойствами тонкого слоя, возникающего на границе между двумя областями монокристалла: областью с электронной и областью с дырочной проводимостью. Для получения такого слоя в одну половину монокристалла вводят атомы-доноры, а в другую — акцепторы. Будем для простоты считать, что сначала между этими областями была некоторая воображаемая перегородка, и в какой-то момент она исчезла. Через границу, разделяющую эти две области, начнется диффузия основных носителей. В самом деле (рис. 155):

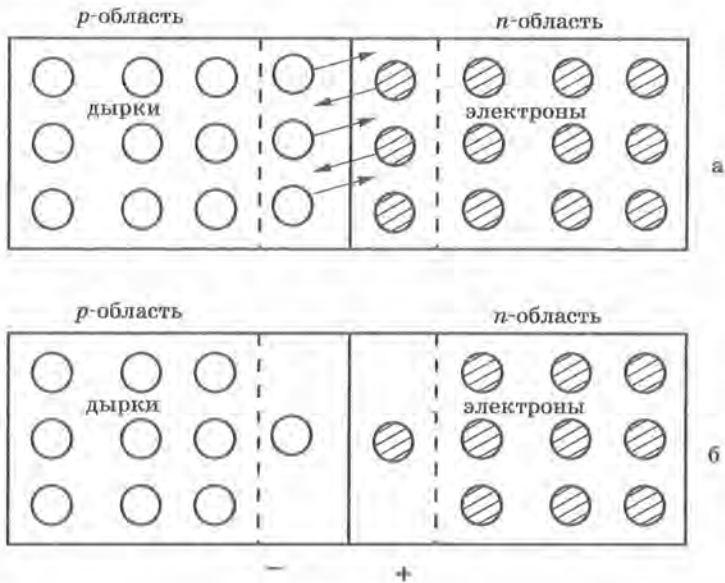


Рис. 155

а) электроны n -области, двигаясь беспорядочно по всем направлениям, будут иногда пересекать границу;

б) дырки p -области заполняются электронами, перескакивающими от разных атомов, в том числе и от «зарубежных». Это означает, что дырки движутся беспорядочно по всем направлениям, и часть их будет пересекать границу.

Если бы частицы были нейтральными, то начавшаяся диффузия привела бы в конце концов к выравниванию концентрации частиц по всему объему кристалла. Но здесь этого не будет, так как оба пограничных участка в результате диффузии зарядятся, и возникшее электрическое поле, как мы сейчас увидим, будет препятствовать дальнейшему перемешиванию основных носителей. В самом деле, пограничный участок n -области в результате ухода «за рубеж» части электронов (и из-за прихода дырок) зарядится положительно. Пограничный участок



Рис. 156

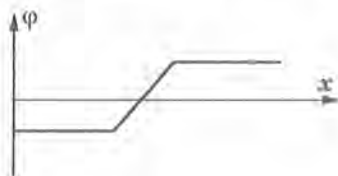


Рис. 157

p -слоя в результате ухода дырок (и прихода электронов) зарядится отрицательно (рис. 155б). При этом пограничные слои окажутся обедненными основными носителями: часть их ушла «за рубеж», а часть рекомбинировала с «пришельцами».

Заряды пограничного слоя будут создавать поле, подобное полю плоского конденсатора (рис. 156). Плоский конденсатор снаружи поля не создает, оно будет существовать в тонком (тоньше 1 мкм) переходном слое. Ход кривой потенциала вдоль кристалла показан на рис. 157 (возникшая разность потенциалов составляет для кремния 0,7–0,8 В, для германия 0,3–0,4 В).

Любой конденсатор обладает свойствами выпрямителя: если между обкладками конденсатора имеются заряженные частицы, то поле конденсатора способствует току от плюсовой обкладки к минусовой и препятствует току в обратном направлении. В данном случае поле переходного слоя препятствует диффузии основных носителей и способствует дрейфу¹ неосновных носителей. Например, если из n -области в переходный слой проникнет электрон (основной носитель), то, как видно из рис. 155 и 156, электрическое поле будет отбрасывать его назад; если же туда проникнет из той же области дырка, то она благополучно продрейфует в p -область. Такая же судьба ожидает основные и неосновные носители p -области, если они забредут в переходный слой.

¹ Дрейфом называют направленное движение частиц под действием электрического поля.

2. Электрическое поле, возникшее в пограничном слое в результате диффузии основных носителей, будет возрастать до тех пор, пока диффузия не прекратится. Но возникшее равновесие не будет статическим. Оно, как и равновесие между паром и жидкостью в закрытом сосуде, обеспечивается встречными потоками частиц (основных и неосновных).

а) Неосновные носители, попавшие в переходный слой, будут подхватываться полем и переправляться «за рубеж». В результате через переходный слой возникнет ток дырок из n -области в p -область и ток электронов из p -области в n -область. Эти два тока мы будем считать за один, так как в обоих случаях направление электрического тока будет одинаковым (этот ток называют дрейфовым).

б) Среди основных носителей найдутся такие, которые сумеют преодолеть «потенциальный барьер» между областями и наперекор полю перескочить в другую область (такой ток, созданный избыточной концентрацией частиц, называют диффузионным).

Эти токи (токи неосновных и основных носителей) противоположны по направлению и при постоянной температуре автоматически уравниваются, как уравниваются встречные потоки молекул на границе между жидкостью и паром в закрытом сосуде.

Упр. 1. Из какой области в какую перемещаются за счет электрического поля переходного слоя: а) электроны; б) дырки?

Упр. 2. Из какой области в какую перемещаются за счет диффузии (т. е. за счет избыточной концентрации частиц): а) электроны; б) дырки?

§ 122. Влияние прямого и обратного напряжения

1. Если приложить к кристаллу, в котором создан p - n переход, разность потенциалов от постороннего источника, то равновесие токов в переходном слое нарушится и

через слой начнет протекать ток. Рассмотрим сначала случай, когда p -область соединили с минусом внешнего источника, а n -область — с плюсом (рис. 158). Поскольку переходный слой обеднен носителями тока, его сопротивление во много раз



Рис. 158

превышает сопротивление остальной части кристалла. Поэтому почти все напряжение источника будет приложено к этому слою (подобно тому, как все напряжение штепсельной розетки оказывается приложенным к лампе, а не к соединительным проводам). Таким образом, в переходном слое возникнет добавочное поле, направленное туда же, куда было направлено первоначальное поле. Разность потенциалов между p - и n -областями возрастет (рис. 159), и основным носителям станет труднее преодолевать повышенный потенциальный барьер. Поэтому ток основных носителей уменьшится. Чем больше приложенное извне напряжение, тем меньше будет этот ток, и если приложенное напряжение достаточно велико, то этот ток полностью прекратится.

Что же касается неосновных носителей, то скорость переброски попавших в переходный слой частиц увеличится, но ток неосновных носителей от этого не изменится. Дело в том, что число ежесекундно подходящих к границе перехода неосновных носителей не изменится, так как оно определяется числом нарождающихся в каждой области пар (электронов и дырок), а это число зависит только от температуры¹.

¹ Кто этого не понял, пусть представит, что к вершине склона ежеминутно прибывают двадцать санок, которые затем скатываются вниз. Если склон сделать круче и длиннее, то скорость санок в конце спуска возрастет, но число санок, ежеминутно прибывающих к подножию склона, останется прежним.

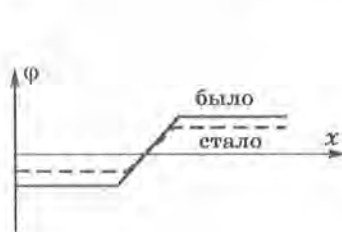


Рис. 159

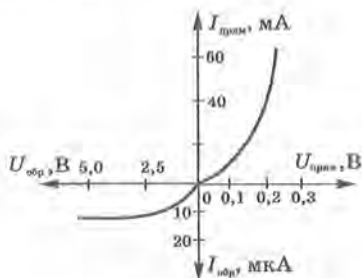


Рис. 160

Итак, в результате приложенного извне напряжения баланс токов в переходе нарушится в пользу неосновного тока. Ток этот ничтожно мал, и в подавляющем большинстве случаев им пренебрегают. То направление внешнего напряжения, при котором ток пренебрежимо мал, называют обратным. Зависимость обратного тока от внешнего напряжения показана на левой части рис. 160 (обратите внимание, что масштаб тока в левой части графика в тысячу раз крупнее, чем в правой части).

2. Если p -область соединить с плюсом источника, а n -область — с минусом (рис. 161), то поле, созданное источником в переходном слое, будет направлено наперекор первоначальному, так что поле там станет слабее, чем было. Разность потенциалов между границами перехода при этом уменьшится (рис. 162). Ток неосновных носителей при этом практически не изменится (так как все неосновные носители, добравшиеся в результате теплового движения «из тыла» до границы перехода, по-прежнему подхватываются полем и переносятся через переход). В то же время число основных носителей, способных преодолеть понизившийся потенциальный барьер, резко возрастает (рис. 160, правая часть).

Это направление называют прямым. Прямой ток в тысячи раз превышает обратный, поэтому можно считать, что кристалл с электронно-дырочным переходом обладает

односторонней проводимостью: он хорошо пропускает ток в одну сторону и почти не пропускает тока в обратном направлении. При этом прямым является то направление, когда к p -области подведен плюс внешнего напряжения. Это удобно запомнить как правило трех П:

p — плюс — прямое.

3. График, изображенный на рис. 160, называют *вольт-амперной характеристикой* полупроводникового диода.



Рис. 161

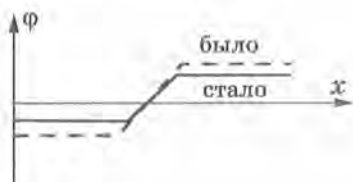


Рис. 162

Упр. 1. Объясните ход левого участка вольт-амперной характеристики (рис. 160).

От в е т: В точке 0 токи основных и неосновных носителей уравновешены. При постепенном увеличении обратного напряжения ток основных носителей постепенно исчезает, а неосновных — остается неизменным. Поэтому результирующий ток растет, пока не останется та составляющая тока, которая состоит из неосновных носителей (этот ток не зависит от напряжения).

Упр. 2. Определите по вольт-амперной характеристике (рис. 160) сопротивление данного кристалла в прямом направлении (при напряжении 0,2 В) и в обратном (при напряжении 50 В).

Упр. 3. Пусть в левую половину кристалла кремния ввели доноры, а в правую — акцепторы: а) какого рода проводимость возникает в левой и правой частях кристалла; б) как зарядятся (в результате диффузии основных носителей) левая и правая части; в) для каких носителей (основных или неосновных) возникший потенци-

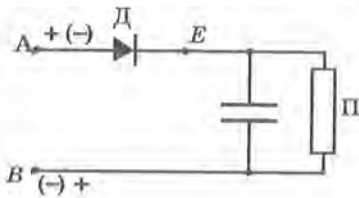


Рис. 163

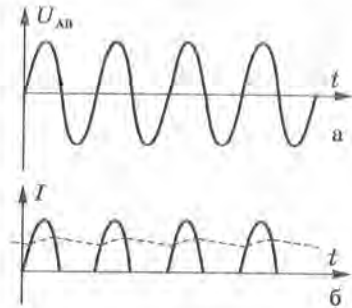


Рис. 164

альный барьер является препятствием; г) как надо подключить внешний источник для получения прямого (т. е. большого) тока?

§ 123. Полупроводниковый диод

1. Устройство, где используется односторонняя проводимость электронно-дырочного перехода, называют полупроводниковым диодом. Такие диоды применяют в выпрямителях для выпрямления переменного тока и в ЭВМ в качестве элементов логических схем. На рис. 163 изображена схема выпрямителя. К клеммам A и B подведено переменное напряжение, так что потенциал клеммы A становится то положительным (по отношению к B), то отрицательным (рис. 164а). Диод D пропускает ток только в те моменты, когда потенциал клеммы A положителен (рис. 164б, сплошная линия). После точки E выпрямленный ток раздваивается. Часть зарядов направляется к конденсатору C , заряжая его. В эти моменты ток в потребителе P меньше, чем в точке E (этот ток показан пунктиром). Зато в те моменты, когда приток зарядов через диод D прекращается, конденсатор разряжается и ток в потребителе продолжается. В результате ток в потребителе будет близок к постоянному (пунктирная кривая).

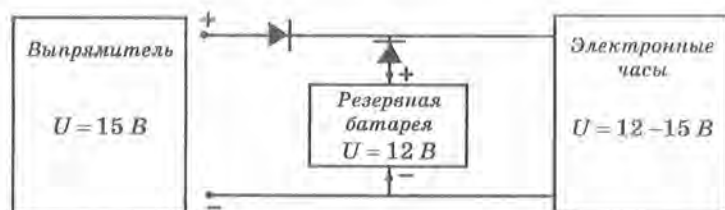


Рис. 165

2. В качестве примера логической задачи, решаемой с помощью диодов, рассмотрим схему питания сверхточных электронных часов. Они питаются от сети через выпрямитель и требуют для работы постоянное напряжение от 12 до 15 В. Если цепь будет отключена (при ремонте сети или в результате аварии), часы ни в коем случае не должны останавливаться — для этого служит резервная батарея. Таким образом, задача ставится так:

а) если выпрямитель работает, то часы должны получать питание от выпрямителя;

б) если выпрямитель не дает напряжения (или дает, но меньше 12 В), то часы получают питание от батареи.

На рис. 165 показана схема, решающая эту задачу с помощью двух полупроводниковых диодов.

§ 124. Транзистор

1. Транзистор является важным элементом многих электронных устройств: радиоприемников, магнитофонов, телевизоров, ЭВМ и т. д. Чтобы понять его назначение, рассмотрим снова схему действия фотореле (рис. 152). В общих чертах принцип действия реле можно объяснить так. К одной части этой схемы подводится небольшая мощность, в результате чего замыкается другая цепь, мощность которой во много раз превышает ту, что подведена была «на вход» этой схемы. Транзистор можно

рассматривать как быстродействующее электронное реле: к одной части транзистора подводится слабый сигнал, в результате чего почти мгновенно в другой части возникает ток, мощность которого во много раз больше мощности подведенного сигнала.

2. Транзистор представляет собой монокристалл кремния или другого полупроводника, в котором созданы три области различной проводимости. В наиболее распространенных транзисторах типа $p-n-p$ средняя область имеет электронную проводимость, а две крайние — дырочную (рис. 166). Таким образом, в транзисторе имеется два электронно-дырочных перехода. Один из них (ЭБ) включен в прямом направлении, другой (КБ) — в обратном. Крайняя область, включенная в прямом направлении, называется *эмиттером*, а в обратном — *коллектором*. Средняя область называется *базой*. В схеме, изображенной на рис. 166, в прямом направлении включено напряжение $U_э = 0,2$ В, а в обратном $U_к - U_э = 10 - 0,2 \approx 10$ В = $U_к$. Переход между эмиттером и базой называют эмиттерным, а между коллектором и базой — коллекторным.

Предположим, что напряжение, поданное на эмиттерный переход, $U_э = 0$. Тогда тока не возникнет ни в эмиттерном переходе (поскольку внешнее напряжение отсутствует), ни в коллекторном (поскольку на него подано обратное напряжение). Если же напряжение, поданное на эмиттерный переход, отлично от нуля, то этот переход окажется открытым для основных носителей. Дырки из эмиттера хлынут в базу. Навстречу двинутся электроны из базы, но этот ток можно не учитывать, так как конденсация электронов в базе сделана в сотни раз меньше, чем концентрация дырок в эмиттере.

База сделана очень тонкой (тоньше 0,01 мм). Поэтому (а также потому, что концентрация электронов в базе невелика) подавляющая часть дырок, проникших в базу (до 99%), не успев рекомбинировать, диффундирует дальше и доходит до второго перехода. Этот переход дырки (как

неосновные для этого перехода носители) пройдут свободно и попадут в коллектор. Здесь они будут подхвачены полем, созданным батареей коллектора. Пройдя до конца коллектор, они закончат свою жизнь, рекомбинируя с электронами, которые прибывают к коллектору по проводам от эмиттера (на самом деле, и по проводам, и внутри транзистора движутся только электроны; в проводе — это свободные электроны, а в транзисторе — это электроны, перепрыгивающие из атома в атом).

Небольшая доля дырок, перешедших из эмиттера в базу (примерно 1%), рекомбинирует с электронами базы. Пополнение базы электронами происходит через провод, соединяющий базу с эмиттером.

Таким образом, в изображенной схеме имеются две цепи. На рис. 167 показано, как замыкаются токи в этих цепях. Ничтожный ток (примерно 1% общего тока) замыкается от эмиттера (внутри транзистора) через базу и через батарею эмиттера $U_{\text{Э}}$, и большой ток замыкается от эмиттера (внутри транзистора) через базу, коллектор и через батарею коллектора $U_{\text{К}}$. Даже небольшое увеличение напряжения, поданного на эмиттерный

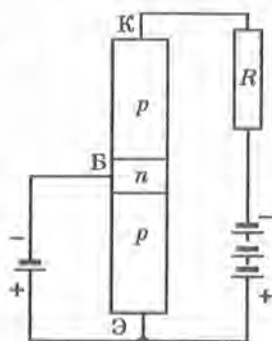


Рис. 166

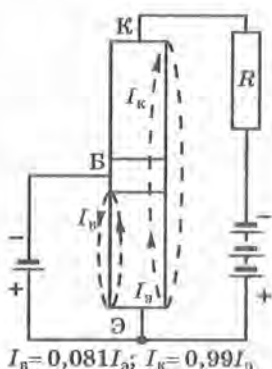


Рис. 167

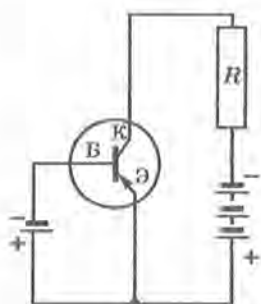


Рис. 168

переход, вызывает резкое увеличение тока в цепи коллектора. Мощность, выделенная на резисторе R включенного в цепь коллектора, может в сотни раз превышать мощность, израсходованную батареей эмиттера.

Приведенная схема называется схемой с общим эмиттером. На рис. 168 приведена эта же схема в общепринятых обозначениях. Конкретные схемы использования транзисторов будут разобраны в третьей части книги.

В полупроводниковых микросхемах и больших интегральных схемах (их еще называют «микрочипы», от английского *chip* — ломтик, кусочек) в кристалл кремния вводят в разные участки донорные или акцепторные примеси и наносят пленки металлов так, что образуются схемы, состоящие из множества транзисторов, полупроводниковых диодов, резисторов, конденсаторов и т. д., причем 1 см^2 кристалла может содержать миллионы таких элементов. Микросхемы и микрочипы служат основой современной радиоэлектроники и компьютерной техники.

§ 125. Электронная эмиссия

1. Во многих современных устройствах используют приборы, в которых ток протекает через вакуум. К таким приборам относятся кинескопы, рентгеновские трубки, фотоэлементы (приборы, преобразующие свет в электрический ток) и многие другие. Строго говоря, идеальный вакуум должен являться идеальным изолятором, так как в пространстве, где нет никаких частиц, нет и заряженных частиц. Однако можно, не нарушая герметичности сосуда, в котором создан вакуум, ввести туда электроны и заставить их двигаться требуемым образом. Для этого в сосуд можно впасть две или несколько металлических пластин (электроды) и одну из них заставить испускать электроны.

Электрод, предназначенный для испускания электронов, называют катодом. В обычных условиях элект-

троны, свободно движущиеся внутри металла, не могут из него вырваться. Если электрон вылетит наружу, то он будет индуцировать в ближайшей к нему части металла положительный заряд, который будет втягивать электрон обратно. Чтобы вылететь из катода, надо совершить против мешающих сил определенную работу, называемую работой выхода. Вырваться из металла могут только те электроны, кинетическая энергия которых больше работы выхода

$$\frac{mv^2}{2} > |A_{\text{вых}}|.$$

В обычных условиях кинетическая энергия электронов в десятки раз меньше этой величины. Необходимую для вылета энергию можно сообщить электронам разными способами:

а) накаливать катод; испускание электронов накалившимся телом называют термоэлектронной эмиссией (слово «эмиссия» означает по-латыни «испускание», «выпуск»);

б) осветить катод видимыми или невидимыми (ультрафиолетовыми, рентгеновскими) лучами; этот способ называют фотоэлектронной эмиссией, или внешним фотоэффектом;

в) направить на катод поток быстрых электронов или ионов (вторичная эмиссия);

г) создать возле катода сверхсильное электрическое поле напряженностью в десятки тысяч В/м (автоэлектронная эмиссия).

2. Катоды, предназначенные для термоэлектронной эмиссии, накаливают электрическим током. В некоторых случаях катод изготавливают в виде тонкой проволоочки, через которую пропускают ток требуемой силы. Такой катод называют катодом прямого накала. Гораздо чаще питают током не сам катод, а отдельную проволочку («нить накала»), которая передает тепло катоду (наподобие того, как спиралька электрического утюга передает тепло корпусу утюга). Катод в этих случаях изготавливают

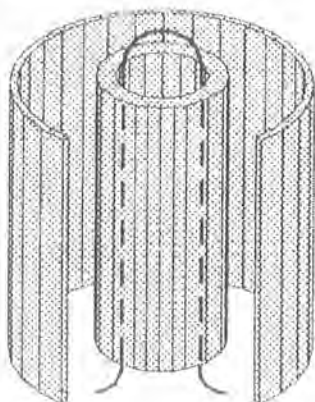


Рис. 169

в виде трубки, внутри которой помещают нить накала. Такое устройство называют катодом косвенного накала, или подогревным.

3. Часть электронов, вылетевших из катода, остается вблизи катода, так как их дальнейшему разлету препятствует отталкивание ранее вылетевших электронов. Разлетевшиеся по всему вакуумному объему электроны образуют так называемый «пространственный заряд». Наибольшая плотность этого заряда получается вблизи катода. Равновесие

электронов в пространственном заряде не является статическим. Если представить, что катод мгновенно накалился, то первое время пространственный заряд будет расти. Но одновременно будет расти и число возвращающихся на катод электронов, пока, наконец, это число не сравняется с числом вылетающих электронов.

§ 126. Двухэлектродная лампа (диод)

1. Простейшим прибором, использующим термоэлектронную эмиссию, является двухэлектродная лампа (диод). Она состоит из стеклянного (иногда металлического) баллона, откуда выкачан воздух, и двух электродов: катода и анода (если катод подогревный, то имеется еще и нить накала, но ее не считают отдельным электродом). Анод часто выполняют в виде цилиндра, охватывающего катод (рис. 169).

В работающей лампе катод испускает электроны. Если соединить анод с положительным полюсом источника ЭДС (с анодной батареей), а катод с отрицательным

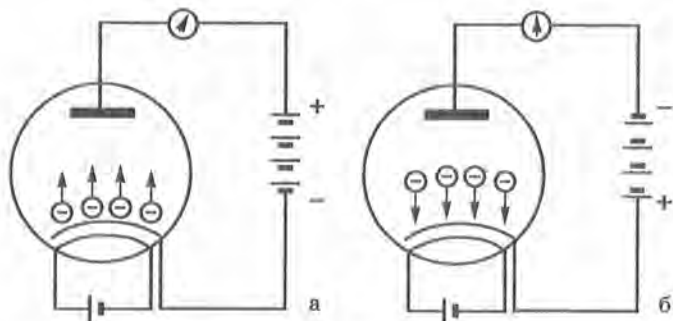


Рис. 170

(рис. 170а), то возникшее поле будет гнать электроны к аноду, и через лампу будет протекать ток (за направление тока принято, как известно, направление, обратное движению электронов). Этот ток будем называть анодным, чтобы не путать его с током, питающим нить накала. Если анод соединить с минусом анодной батареи, а катод — с плюсом (рис. 170б), то возникшее поле будет отталкивать электроны от анода, т. е. движения электронов к аноду не возникнет. Таким образом, двухэлектродная лампа обладает односторонней проводимостью: ток через нее может протекать только от анода к катоду. Это свойство используется для выпрямления переменного тока: ясно, что если между анодом и катодом такой лампы включить источник не постоянного, а переменного напряжения (т. е. такого напряжения, которое меняет свой знак, так что на анод лампы будет подаваться то «плюс», то «минус» по отношению к катоду), то ток через лампу будет протекать толчками только в одну сторону. Такой ток называют выпрямленным.

Упр. 1. С какой скоростью электроны достигают анода, если напряжение между электродами 100 В? Начальной скоростью электронов, вылетающих с катода, пренебречь.

О т в е т: 6000 км/с.

§ 127. Вольт-амперная характеристика диода

1. Вольт-амперной характеристикой диода называют зависимость анодного тока от напряжения между анодом и катодом. Вид этой характеристики показан на рис. 171. Ход ее легко объяснить. Представим сначала, что напряжение на анод не подано (но анодная цепь замкнута, т. е. анод соединен проводником с катодом). Часть электронов, вылетающих из накаливаемого катода, сможет, несмотря на отсутствие ускоряющего поля, преодолеть отталкивающее действие пространственного заряда и добраться до анода. Отсюда они перейдут по проводу на катод, и в этой цепи непрерывно будет протекать ток, правда, очень слабый (точка *B* на графике). Этот ток полностью прекратится, если создать между анодом и катодом хотя бы слабое тормозящее поле (точка *A* на графике). Если же включить анодную батарею так, чтобы поле, ею созданное, не тормозило, а, наоборот, ускоряло вылетающие из катода электроны, то ток резко возрастет (точка *C*). По мере увеличения анодного напряжения доля электронов, сумевших пробиться сквозь «электронное облако» к аноду, будет возрастать, а доля возвращающихся

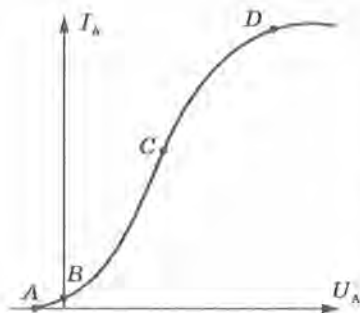


Рис. 171

на катод электронов, соответственно, уменьшаться (плотность пространственного заряда будет при этом уменьшаться). При достаточно высоком напряжении ни один электрон, вылетевший из катода, не сможет вернуться в катод; число электронов, ежесекундно достигающих анода, сравняется в этом случае с числом электронов, ежесекундно покидающих катод (точка *D*

на графике). Если повышать анодное напряжение сверх этой величины, ток расти уже не будет. Это явление называют «насыщением».

Явление насыщения свойственно не только электронным процессам. Вот простейший пример. Если увеличивать мощность насоса, подающего воду из родника, то количество воды, поступающее ежесекундно потребителю, будет возрастать лишь до тех пор, пока оно не сравняется с количеством воды, «эмиттируемой» родником.

2. Явление насыщения четко наблюдается в катодах, сделанных из чистого вольфрама. В некоторых катодах (так называемых оксидных) явления насыщения не наблюдается. Одной из причин является то, что катод дополнительно нагревается анодным током, что вызывает увеличение эмиссии катода, что в свою очередь ведет к дополнительному увеличению анодного тока.

Упр. 1. Начертите схему, которую надо собрать для экспериментального определения вольт-амперной характеристики данного диода (участка *BCD*). Считать, что имеется диод, батарея накала (которая дает точно требуемое напряжение), анодная батарея, миллиамперметр (для измерения анодного тока), вольтметр, потенциометр и соединительные провода.

§ 128. Электронно-лучевая трубка

1. Электронно-лучевая трубка является важнейшей частью телевизора, компьютерного дисплея и осциллоскопа. В такой трубке поток электронов, испускаемых накалившимся катодом, используется для получения светящегося изображения на экране. Устройство трубки показано на рис. 172. Она состоит из баллона, откуда выкачан воздух, и ряда электродов. В узком конце трубки расположен «электронный прожектор», т. е. источник пучка электронов. Электронный прожектор состоит из катода косвенного накала *K*, управляющего электрода

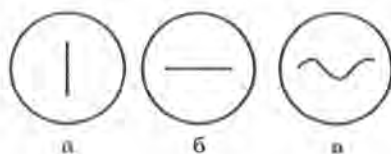


Рис. 173

от друга электронов, можно заставить заметно отклониться за ничтожно малый промежуток времени, измеряемый наносекундами (нано = 10^{-9}).

Пусть требуется исследовать быстро меняю-

щееся напряжение в какой-либо цепи (например, при наладке телевизора). Это напряжение можно подать на пластины В трубки осциллографа (см. рис. 172). Светлая точка на экране начнет при этом колебаться в вертикальном направлении. Если эти колебания происходят очень часто, то глаз увидит сплошную линию (рис. 173а), и мы не сможем узнать ни частоты колебаний, ни того, какова была величина исследуемого напряжения в каждый отдельный момент времени. Чтобы узнать то и другое, изображение надо «развернуть». Для этого на пластины горизонтального отклонения (Г) подается напряжение от специального «генератора развертки». Этот генератор заставляет пятно на экране равномерно двигаться от левого края экрана к правому, а затем скачком возвращаться в начальную точку (все это продлевается много раз каждую секунду). Если напряжение на пластины В при этом не подано, глаз увидит на экране горизонтальную линию (рис. 173б). Что получится, если при работающем генераторе подать на пластины В исследуемое напряжение? Светлая точка на экране, не переставая двигаться вправо, начнет одновременно отклоняться вверх, затем вниз, и на экране появится график, показывающий изменение этого напряжения во времени (рис. 173в).

Упр. 1. Учитывая, что смещение луча от центра экрана пропорционально напряжению, поданному на пластины, определите, какой примерно вид должен иметь график напряжения, вырабатываемого генератором развертки (ответ представьте в виде графика).

О т в е т: См. рис. 174.

Упр. 2. Какой вид будет иметь линия на экране трубки, если на пластины горизонтального и вертикального отклонения подать одно и то же напряжение, например, напряжение от генератора развертки?

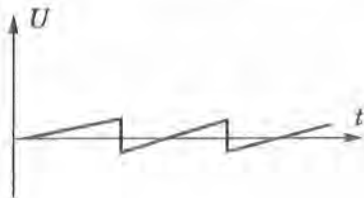


Рис. 174

Упр. 3. а) Камень брошен горизонтально со скоростью v . На какое расстояние y сместится он по вертикали, если по горизонтали он пролетит расстояние l ? б) Электрон, заряд которого e , а масса m , двигавшийся горизонтально со скоростью v , попал между пластинами В электронно-лучевой трубки. На какое расстояние y он сместится, пролетев между пластинами, если длина пластин l , расстояние между пластинами d , а напряжение между ними U ?

О т в е т: б)
$$y = \frac{eU}{2md} \cdot \frac{l^2}{v^2}.$$

Упр. 4. На какое дополнительное расстояние сместится электрон (см. *упр. 3*), пока долетит по инерции до экрана? Расстояние от конца пластин до экрана (по горизонтали) равно L .

О т в е т:
$$\frac{eUL}{mdv_0^2}.$$

§ 130. Природа тока в электролитах

1. При прохождении тока через металлы химический состав их не меняется. Но не все вещества обладают такими свойствами. Например, если пропускать ток через раствор медного купороса, то на одном из электродов будет выделяться медь. *Выделение вещества на электродах назвали электролизом, а проводники, в которых при пропускании тока происходят химические изменения, — электролитами.* Опыты показывают, что все

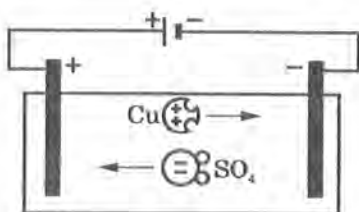


Рис. 175

проводящие растворы (растворы солей, щелочей и кислот) являются электролитами¹. Электролитами являются также расплавы солей и щелочей.

2. Опыты показывают, что вещества, из которых составлен проводящий раствор, взятые порознь, являются изоляторами.

Например, ни вода (дистиллированная), ни кристаллическая поваренная соль тока не проводят. Стало быть, свободных зарядов в этих веществах нет, они появляются при растворении. В воде молекула поваренной соли распадается на ионы Na^+ и Cl^- . Распад молекулы на ионы при растворении или расплавлении называют электролитической диссоциацией.

Наряду с распадом происходит и обратный процесс объединения случайно встретившихся разноименных ионов. Восстановление нейтральных молекул называют рекомбинацией. При неизменных внешних условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие: число восстанавливающихся в единицу времени молекул становится равным числу распадающихся (диссоциирующих) молекул.

3. Если создать в электролите электрическое поле, то свободные ионы начнут перемещаться: положительные — к катоду, отрицательные — к аноду (рис. 175). Сила тока, как показывает опыт, пропорциональна приложенному напряжению. Дальнейшая судьба ионов, прибывающих к электродам, зависит от материала электрода и растворителя. Если они не вступят в реакцию ни с тем, ни с другим, то на электроде происходит выделение прибывшего к электроду вещества.

¹ Иногда электролитами называют не растворы, а те вещества, растворы которых являются проводящими.

4. Во многих случаях (например, при электролитическом покрытии металлов) требуется, чтобы концентрация ионов в растворе оставалась неизменной, несмотря на непрерывную их убыль. В этих случаях анод делают из того же материала, что и вещество, выделяющееся на катоде. Например, если на катоде выделяется медь, то анод делают из меди. Вместо выбывших из раствора ионов меди такое же количество ионов переходит в раствор с анода.

Упр. 1. Покажите, пользуясь рис. 175, как замыкается при электролизе цепь тока, т. е. как заряженные частицы, сменяя в разных участках друг друга, совершают замкнутый путь.

Ответ: Пусть в каком-либо месте раствора распалась молекула медного купороса. Ион SO_4^- , имеющий 2 лишних электрона, дойдет до анода и отдаст ему эти электроны. Эти электроны будут подхвачены электрическим полем, созданным источником тока, и переправлены через соединительные провода и через источник тока к катоду. Там они встретятся с положительным ионом меди и отдадут ему недостающие электроны. В результате через каждое сечение этой цепи прошел (по часовой стрелке) заряд $-2e$.

Упр. 2. Для подготовки к выводу основного закона электролиза решите три задачи:

а) Какова масса атома меди, если молярная масса меди $M = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а число Авогадро $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль?

Решение. Чтобы найти массу одной частицы, надо поделить массу моля частиц на число частиц в моле:

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{64 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{6 \cdot 10^{23}} = 1,1 \cdot 10^{-25} \text{ кг.}$$

б) Сколько потребовалось носильщиков, чтобы перенести груз $q = 1000$ кг (например, картошки), если каждый берет $n = 2$ мешка по $e = 25$ кг каждый?

в) Сколько ионов меди прошло в одну сторону, если сообщи они перенесли заряд q ? Степень окисления меди равна n , т. е. каждый ион несет заряд en (где e — элементарный электрический заряд).

§ 131. Закон электролиза

1. Носителями тока в электролитах, как мы выяснили, являются ионы, т. е. заряженные атомы или группы атомов. Каждый ион при своем движении переносит определенную массу и определенный заряд. Этот заряд он передает электроду (отдавая ему «лишние» электроны или получая недостающие) и становится нейтральным атомом. Зная величину заряда q , переданного электроду за некоторое время, можно рассчитать суммарную массу, атомов, прибывших к этому электроду:

$$\text{Суммарная масса} = \frac{\text{Масса}}{1 \text{ атома}} \times \frac{\text{Число атомов, перенесших заряд } q}{\text{перенесших заряд } q}.$$

Чтобы рассчитать массу одного атома (в кг), надо массу моля атомов поделить на число атомов в моле, т. е. на число Авогадро N_A :

$$\text{Масса 1 атома} = \frac{M}{N_A}.$$

Чтобы рассчитать число атомов, перенесших сообщая заряд q , надо разделить этот заряд на заряд одного атома, т. е. на en (где e — заряд электрона, n — степень окисления атома):

$$\text{Число атомов-носильщиков} = \frac{q}{en}.$$

Перемножив одно на другое, найдем массу вещества, перенесшего заряд q к электроду:

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot \frac{q}{en}, \quad (1)$$

где q — заряд, прошедший через электролит, m — общая масса атомов, выделившихся при этом на данном электроде, e — заряд электрона, n — степень окисления атома, M — молярная масса.

2. Для практических расчетов полученную формулу представляют в следующем виде:

$$m = kq = kIt, \quad k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n}.$$

Таким образом, *масса выделившегося на электроде вещества пропорциональна силе тока, времени и зависит от природы выделившегося вещества*. В таком виде этот закон был открыт в 1834 г. опытным путем Фарадеем («закон электролиза Фарадея») задолго до того, как было установлено существование элементарного заряда и выяснена природа тока в электролитах.

Коэффициент k называют *электрохимическим эквивалентом данного вещества* и выражают в кг/Кл. Его находят обычно опытным путем, используя закон Фарадея.

Упр. 1. Не решая уравнения (1), найдите непосредственным рассуждением, чему равен заряд q , перенесенный через электролит, когда на нем выделилось вещество массой m (считать по-прежнему известными M , e , n , N_A).

У к а з а н и е. Заряд q , прошедший через электролит, равен заряду одного иона, помноженному на число ионов (атомов) общей массой m .

§ 132. Как догадались о существовании элементарного заряда

Основываясь на современных представлениях о природе тока в электролитах, легко вывести закон электролиза. Историческое развитие учения об электролизе происходило в обратной последовательности. Сначала Фарадей опытным путем установил в 1834 г. закон электролиза ($m = kq$), который формулировался вне связи с молекулярной теорией (молекулярная теория была разработана еще недостаточно; например, молекулы всех простых веществ ошибочно считались одноатомными, вследствие чего атомные массы многих веществ были определены неверно). Впоследствии, сопоставив закон Фарадея с молекулярной теорией, пришли к выводу, что электрические заряды не могут делиться на любые порции, а существует наименьший электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Вос-

произведем ход рассуждений, который привел к этому выводу.

Если признать существование атомов, то из закона Фарадея ($m = kq$) следует, что число выделившихся на электроде атомов пропорционально заряду, прошедшему через электролит. Значит, одновременно с каждым атомом данного вещества всегда переносится один и тот же заряд. Этот заряд можно рассчитать. Для этого полный заряд q , прошедший через электролит, надо разделить на число атомов, перенесших этот заряд (число атомов равно $\frac{m}{M} N_A$). При этом оказалось, что каждый атом любого одновалентного вещества (или, как теперь говорят, вещества, степень окисления которого равна единице) переносит заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, любого двухвалентного — $2e$, трехвалентного — $3e$. Для объяснения этого факта предположили (Максвелл в 1873 г. и Гельмгольц в 1881 г., которые впервые провели подобные рассуждения), что не существует порций заряда, меньших, чем e . Эта гипотеза, казалось бы, не очень обоснованная¹, впоследствии подтвердилась.

§ 133. Применение электролиза

1. Промышленное получение ряда металлов (алюминия, магния, натрия) и некоторых других веществ (фото-

¹ Один из физиков (Дж. Дж. Томсон) продемонстрировал недостаточную убедительность приведенного рассуждения таким примером. Погружая литровую кружку в бочку с пивом, мы всегда зачерпываем литр пива. Делаем вывод: пиво может существовать только в виде литровых порций.

Другое возражение: быть может, закон Фарадея выполняется только в среднем, статистически. Например, если общий вес миллиона повобранцев составляет 65 миллионов кг, а двух миллионов — 130 миллионов кг, отсюда вовсе не следует, что каждый повобранец весит точно 65 кг.

ра, хлора). Руду, содержащую требуемое вещество, расплавляют в электрической печи, и в той же печи производят электролиз. Выделяемое при прохождении тока тепло поддерживает руду в расплавленном состоянии.

2. Покрытие металлических изделий тонким слоем другого металла (хромирование, никелирование, серебрение и т. д.) для предохранения от коррозии и для улучшения внешнего вида.

3. Получение точных копий рельефных предметов. Например, для получения копий граммофонной пластинки (диска) надо сначала сделать пресс-форму, которая являлась бы «обратной копией» звуковой дорожки этой пластинки. Для этого пластинку делают проводящей, обмазав ее тонким слоем графита, и с помощью электролиза осаждают на ней толстый слой металла. После того, как пластинку отслаивают от металла, получается форма, которая позволяет прессовать из горячей пластмассы множество копий первой пластинки.

4. Очистка (рафинирование) меди и других металлов. В некоторых случаях даже ничтожные доли примеси резко ухудшают качество металла (например, примесь 0,13% фосфора ухудшает проводимость меди почти втрое). Для очистки от примесей меди, выплавленной из руды, болванку из неочищенной меди помещают в раствор медного купороса и соединяют ее с плюсом источника тока (т. е. делают болванку анодом). Напряжение в ванне удается подобрать так, чтобы до катода доходили только атомы меди, а посторонние примеси выпадали на дно в виде осадка. На катоде осаждается чистая медь, причем концентрация раствора не меняется, так как взамен ушедших из раствора ионов меди в него поступают из анода новые ионы меди.

§ 134. Природа тока в газах

1. В нормальных условиях все газы являются изоляторами. Например, размыкание любой цепи рубильником

сводится к тому, что в эту цепь вводится прослойка воздуха. Провода высоковольтных линий передач надежно изолированы друг от друга и от земли только слоем воздуха. Опыты по электростатике (с которых начинают обычно изучение электричества) были бы невозможны, если бы воздух не обладал изолирующими свойствами (возникшие на разных телах заряды сразу бы перемешивались). Но при некоторых условиях любой газ может стать проводником. Это подтверждается существованием молнии, электрической дуги, ламп дневного света и т. п. Отсюда следует, что в обычных условиях в газах нет сколько-нибудь заметного количества свободных зарядов, но при некоторых условиях они могут возникнуть.

2. Исследования привели к выводу, что свободные заряды в газах возникают в результате отрыва электронов от нейтральных атомов. Этот процесс называется *ионизацией газа*. Чтобы вырвать из атома электрон, надо совершить определенную работу, и если атом получит энергию меньше, чем энергия ионизации, то электрон из атома не вылетит. Энергию, нужную для ионизации, атом может получить либо столкнувшись с электроном¹, либо поглощая энергию от рентгеновских или других лучей (ультрафиолетовых, гамма-лучей). В некоторых случаях атом может поглотить энергию, меньшую той, что надо для ионизации. В этом случае электрон не вылетит из атома, а перескочит на более далекую от ядра орбиту. Такой атом называют возбужденным.

Из сказанного следует, что сделать газ проводящим можно разными способами:

- а) сильно его накаливать (до нескольких тысяч градусов);
- б) облучить газ ультрафиолетовыми, рентгеновскими или гамма-лучами;

¹ Быстро движущиеся ионы и нейтральные атомы также способны ионизировать газ, но по ряду причин почти во всех рассматриваемых далее случаях ударная ионизация может производиться только электронами.

в) поместить газ в сильное электрическое поле. Если в газе имеется хотя бы ничтожное количество свободных электронов, то в сильном поле они получают кинетическую энергию, достаточную для ионизации газа. Число заряженных частиц может резко возрасти, и газ станет хорошим проводником.

2. Наряду с ионизацией в газах всегда происходит и обратный процесс воссоединения нейтральных атомов. Этот процесс называют *рекомбинацией*. Из-за рекомбинации газ восстанавливает изолирующие свойства вскоре после того, как исчезают причины, вызывающие ионизацию.

Если действие ионизатора неизменно, то в газе устанавливается динамическое равновесие, при котором число ежесекундно рекомбинирующих пар (электронов и ионов) становится равным числу нарождающихся ежесекундно пар.

При рекомбинации, а также при переходе атома из возбужденного состояния в «основное», атомы отдают избыток энергии в виде света или ультрафиолетовых лучей. Поэтому ионизированный или возбужденный газ обычно светится (при этом газ может оставаться холодным).

Упр. 1. Число пар (электронов и ионов), возникающих в 1 см^3 воздуха над сушией за 1 с (под действием радиоактивных примесей и космических лучей) в среднем равно 8. Определите равновесную концентрацию ионов в воздухе, считая, что число рекомбинирующих в секунду пар $\Delta n = 0,01n$, где n — концентрация пар.
О т в е т: 800 см^{-3} .

§ 135. Основные виды разряда при атмосферном давлении

1. Прохождение тока через газ называют *газовым разрядом*. Слабый разряд возникает в воздухе даже при небольшой разности потенциалов между электродами, так как в воздухе всегда присутствует небольшое количество

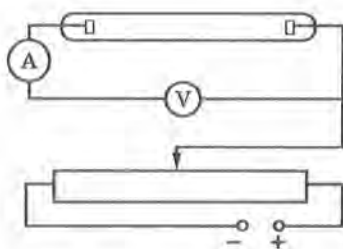


Рис. 176

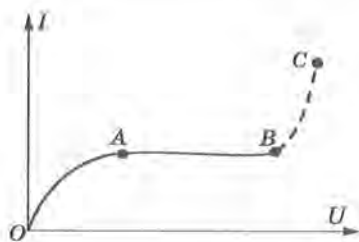


Рис. 177

электронов и ионов. Эти ионы возникают под действием излучений радиоактивных примесей земной коры и под действием космических лучей, приходящих из космоса. Число возникающих каждую секунду ионов настолько ничтожно (несколько пар в каждом кубическом сантиметре), что обнаружить разрядный ток обычными приборами невозможно. Такой разряд не сопровождается световыми (и звуковыми) эффектами. Примером является саморазряд воздушного конденсатора. Происходит он настолько медленно, что воздух по справедливости считают хорошим изолятором.

2. Рассмотрим, как зависит ток разряда от приложенного к электродам напряжения (рис. 176). Вид типичной вольт-амперной характеристики газового разряда приведен на рис. 177. Вначале с ростом напряжения ток растет (участок OA графика), так как с ростом напряжения растет скорость, а стало быть, и число заряженных частиц, успевших достигнуть электродов, не рекомбинировав по пути. Затем рост тока прекращается, наступает насыщение (участок AB). Объясняется это тем, что в промежутке между электродами каждую секунду рождается вполне определенное количество свободных электронов и ионов, например, 400 пар. Ясно, что количество каждую секунду прибывающих на каждый электрод заряженных частиц не может превысить этой величины.

Если теперь изолировать разрядный промежуток от космических лучей и других ионизаторов (но не отключать приложенного напряжения), то разряд прекратится. Разряды, прекращающиеся при отключении внешних ионизаторов, называют несамостоятельными.

При дальнейшем возрастании напряжения ток снова начинает расти (участок *BC*). Объясняется это тем, что при достаточно большой напряженности поля кинетическая энергия электронов, разгоняемых полем, становится достаточной для ионизации атомов. Вырванные при этом из атомов электроны в свою очередь ускоряются полем и ионизируют новые атомы. Число заряженных частиц растет подобно лавине. Однако разряд продолжает оставаться несамостоятельным, так как если прекратить действие внешнего ионизатора, то лавины перестанут зарождаться.

3. При дальнейшем возрастании напряжения (участок правее точки *C*) разряд переходит в самостоятельный, т. е. продолжается и после того, как выключат внешний ионизатор. Объясняется это тем, что ионы, ударяющиеся о катод, могут выбивать из него электроны. Если удары станут настолько сильными и частыми, что вместо каждого выбившего (в результате попадания на анод или рекомбинации) электрона из катода будет выбит новый электрон, то разряд будет сам себя поддерживать и станет самостоятельным. Характер перехода от несамостоятельного разряда к самостоятельному зависит от давления газа, от расстояния между электродами, от величины «балластного сопротивления», ограничивающего рост тока до определенного предела, а также от мощности источника тока.

4. При атмосферном (и более высоком) давлении может возникнуть искровой разряд. Проскакивание искры означает резкое увеличение тока разряда. В результате резкого увеличения тока напряжение между электродами резко падает. Причина — та же, по которой падает напряжение генератора при коротком замыкании (наглядно это можно объяснить тем, что при сильном токе запас

зарядов, накопленных на электродах генератора, не успевает восстанавливаться; формально это легко объяснить ссылкой на закон Ома для замкнутой цепи: при увеличении тока увеличивается потеря напряжения внутри источника и т. д.). Вследствие уменьшения напряжения на электродах ударная ионизация прекращается, и газ благодаря рекомбинации быстро восстанавливает изолирующие свойства. Но тогда вследствие уменьшения тока напряжение между электродами снова «подскочит» до первоначальной величины, и снова начнется возникновение лавин. Снова проскочит искра и т. д. (длительность одного разрядного импульса в зависимости от условий разряда может находиться в пределах от 0,1 до 100 мкс). Если мощность источника достаточно велика, то искровой разряд может перейти в дуговой. Молния также является примером искрового разряда.

5. Для получения высоких температур (при сварке или для создания ярких источников света) используют дуговой разряд. Для получения дуги при электросварке электроды соприкасаются друг с другом и пропускают через них большой ток. Сильнее всего нагреваются места соприкосновения электродов, так как в этих местах сопротивление цепи наибольшее (а количество выделяемого тепла $Q = I^2 R t$). Когда электроды раздвигают, электроны, испускаемые раскаленными участками катода, ионизируют воздух. Высокая проводимость воздуха обеспечивается потоком электронов, испускаемых катодом, и термической ионизацией (т. е. ионизацией, вызванной столкновениями очень быстро летящих атомов).

Температура в дуге достигает нескольких тысяч градусов. В пламени дуги можно расплавить (и даже обратить в пар) любое вещество. Ток в дуге может быть от десятых долей ампера до тысяч ампер. Для поддержания дуги достаточно напряжение в несколько десятков вольт.

Впервые дуга была получена русским физиком Петровым в 1802 г.

§ 136. Тлеющий разряд

1. Если создать в трубке пониженное давление (от ста до тысячи раз меньше атмосферного) и подать на электроды напряжение порядка ста вольт, то в слое газа вблизи катода возникает «тлеющее», т. е. спокойное и неяркое, свечение. Такой разряд называют тлеющим. Тлеющий слой окружен с обеих сторон темными областями (рис. 178). Если трубка достаточно длинная, то между анодом и темным пространством возникает светящаяся область, называемая положительным столбом (чем длиннее трубка, тем длиннее этот столб).

Тлеющий разряд можно использовать в качестве источника света. В небольших лампах используют тлеющее свечение, а в длинных трубках — свечение положительного столба. Небольшие неоновые лампы используют как сигнальные: они потребляют ничтожный ток (порядка 1 мА) и все же дают заметное свечение. Длинные трубки, заполненные разреженными газами, используют как рекламные (неон дает красное свечение, пары ртути — голубое и т. д.). Тлеющий разряд (в парах ртути) используют также в лампах дневного света. В процессе разряда в этих лампах возникает ультрафиолетовое излучение. Попадая на специальное вещество, покрывающее изнутри стенки лампы, ультрафиолетовые лучи вызывают его свечение. Такие лампы потребляют меньше энергии, чем лампы накаливания. Для освещения улиц широко используют лампы, основанные на разряде в парах ртути (сине-фиолетового цвета) или натрия (ярко-желтые).

2. Тлеющий разряд является самостоятельным. Положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны, которые ионизируют газ.



Рис. 178

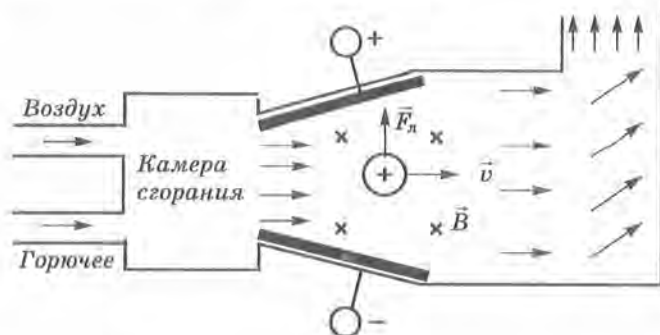


Рис. 179

щаться к одному электроду, а отрицательные — к другому. Между электродами, на которых будут накапливаться заряды, возникнет разность потенциалов, а во внешней цепи, подключенной к электродам, возникнет ток.

Принципиальная работоспособность такой схемы МГД-генераторов испытана на небольших моделях, и если бы удалось разработать достаточно термостойкие материалы и показать возможность надежной и длительной работы мощных установок промышленного масштаба, это было бы значительным шагом в развитии энергетики.

ДВИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА

§ 1. Абсолютно твердое тело

1. В механике материальной точки изучалось движение тел, размерами которых можно было пренебречь. Для таких тел не имело значения, в каком месте были приложены силы — движение от этого не зависело. Для исчерпывающего описания положения материальной точки в пространстве было достаточно трех чисел (число степеней свободы материальной точки равнялось 3).

2. Существует множество ситуаций, в которых модель материальной точки неприемлема. На рис. 1 изображен человек, пытающийся передвинуть шкаф, рискуя уронить его на бок. Шкаф нельзя считать материальной точкой по следующим причинам:

1) его размеры сравнимы с предполагаемым перемещением и ростом человека;

2) результат действия сил зависит от точки их приложения: если толкать шкаф снизу, он скорее всего начнет скользить по полу, а если упереться повыше — упадет на бок;

3) результат перемещения шкафа нельзя описать при помощи только трех чисел: хозяину квартиры безразлично не только то, где окажется его шкаф, но и на каком боку он будет лежать (особенно если внутри хранится посуда).

Таким образом, полезно уметь описывать движение тел конечных размеров.

¹ Подготовлено А. С. Чирцовым.

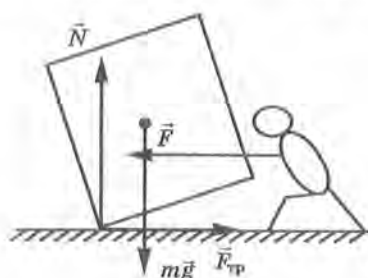


Рис. 1

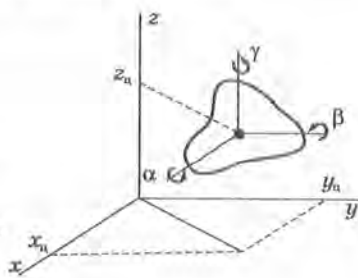


Рис. 2

На первый взгляд, может показаться, что для описания движения протяженных тел их можно представить себе как совокупность точечных частиц (например, молекул). Если бы удалось рассчитать движение каждой такой частицы, задача о движении всего тела была бы решена. На практике такой подход чаще всего невозможен из-за огромного числа степеней свободы такой системы — $3N$ (N — число частиц). Количество уравнений, которые надо решить для описания системы, равно числу ее степеней свободы и в случае макроскопических тел столь велико, что задача не может быть решена даже на современных компьютерах.

3. Во многих практических задачах приходится иметь дело с телами, размеры и форма которых слабо меняются в процессе движения. Для расчета движения таких тел может использоваться модель абсолютно твердого тела.

Абсолютно твердым телом называется тело, расстояние между любыми двумя точками которого остается постоянным в процессе движения.

Для задания положения абсолютно твердого тела требуется 6 чисел. Например, можно указать положение центра масс (три декартовы координаты) и три угла поворота вокруг трех взаимно перпендикулярных осей (рис. 2). Наличие всего шести степеней свободы у твердого тела делает задачу о расчете его движения небезнадежной.

§ 2. Равнодействующая сил, приложенных к твердому телу

1. В механике материальной точки нахождение равнодействующей сил, приложенных к телу, не составляло труда (рис. 3). В случае протяженного тела задача осложняется тем, что силы могут быть приложены к разным точкам тела (рис. 4).

2. Опыт показывает (и это можно строго доказать, исходя из законов Ньютона), что результат действия силы на твердое тело не изменится, если точку ее приложения сместить на любое расстояние по прямой, вдоль которой действует сила. Это свойство позволяет легко найти равнодействующую двух непараллельных сил, перенеся их в точку пересечения прямых, вдоль которых эти силы действуют (рис. 5).

Ситуация усложняется в случае параллельных сил, действующих в одном направлении (рис. 6). Добавляя к заданным силам \vec{F}_1 и \vec{F}_2 две одинаковые противоположно направленные силы \vec{f}_1 и \vec{f}_2 , которые компенсируют друг друга, получаем две непараллельные силы $\vec{F}'_1 = \vec{F}_1 + \vec{f}_1$ и $\vec{F}'_2 = \vec{F}_2 + \vec{f}_2$. Перенося их вдоль линий действия, получаем силы \vec{F}'_1 и \vec{F}'_2 . Сумма этих сил $\vec{F}'_p = \vec{F}'_1 + \vec{F}'_2$ и является искомой равнодействующей. При желании ее можно перенести так, чтобы точка приложения попала на тело \vec{F}'_p .

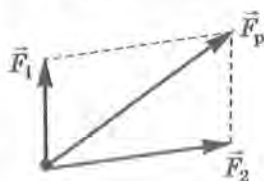


Рис. 3

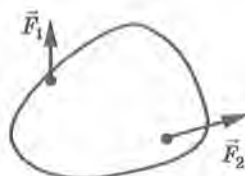


Рис. 4

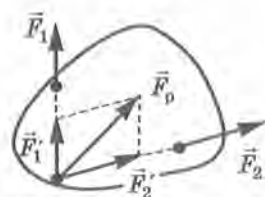


Рис. 5

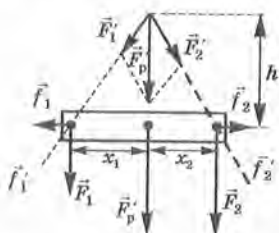


Рис. 6

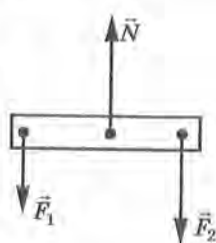


Рис. 7

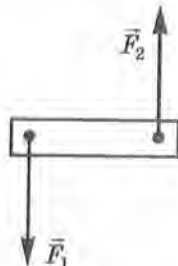


Рис. 8

Из простых геометрических соображений легко получить, что

$$F_p = F_1 + F_2,$$

$$\frac{x_1}{h} = \frac{f_1}{F_1}, \quad \frac{x_2}{h} = \frac{f_2}{F_2}.$$

Из последних двух равенств (с учетом $f_1 = f_2$) получаем, что точка приложения равнодействующей располагается так, что плечи x_1 и x_2 обратно пропорциональны силам:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{F_2}{F_1} \text{ или } F_1 x_1 = F_2 x_2.$$

Если под точку приложения равнодействующей подвести опору (рис. 7), возникнет сила реакции \vec{N} , которая компенсирует \vec{F}_p . В результате тело будет находиться в равновесии. Этим объясняется тот факт, что последнее из полученных равенств совпадает с хорошо известным «правилом рычага».

3. В случае двух равных сил, направленных в противоположные стороны, равнодействующей вообще не существует (рис. 8). Это означает, что тело не может находиться в равновесии ни при каком положении опоры. Под действием такой пары сил тело обязательно будет вращаться.

§ 3. Движение центра масс абсолютно твердого тела

1. В общем случае движение абсолютно твердого тела может быть весьма сложным. Однако его всегда можно разложить на сумму двух движений: перемещения центра масс и вращения вокруг этого центра.

2. Закон движения центра масс тесно связан с законом сохранения импульса тела, определяемого как сумма импульсов входящих в тело частиц:

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p}_i = \sum_i m_i \vec{v}_i,$$

где m_i — масса i -й частицы, \vec{v}_i — ее скорость. Скорость изменения импульса любой системы материальных точек определяется суммой внешних сил, действующих на нее:

$$\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \sum_i \vec{F}_i^{(\text{внеш})}.$$

С другой стороны, полный импульс может быть записан как произведение полной массы $M = \sum_i m_i$ на скорость центра масс $\vec{V}_{\text{ц.м.}}$:

$$\vec{P} = M \cdot \vec{V}_{\text{ц.м.}}$$

Комбинируя два последних уравнения, получаем закон движения центра масс тела, по форме совпадающий со вторым законом Ньютона для материальной точки:

$$M \frac{\Delta \vec{V}_{\text{ц.м.}}}{\Delta t} = \sum_i \vec{F}_i^{(\text{внеш})}.$$

Следствием последнего уравнения является тот замечательный факт, что *центр масс тела движется так, как двигалась бы материальная точка, масса которой равна массе тела.*

§ 4. Момент импульса материальной точки

Прежде чем приступить к обсуждению вопросов, связанных с вращением твердого тела, рассмотрим движение материальной точки по окружности постоянного радиуса с переменной скоростью. Пусть радиус окружности — r , масса тела — m , его скорость — \vec{v} , импульс — \vec{P} (рис. 9). Кроме энергии и импульса, для характеристики вращательного движения можно ввести еще одну полезную величину — *момент импульса*. Определим¹ его как произведение импульса материальной точки на радиус окружности:

$$l = P \cdot r = mv \cdot r.$$

Если на тело действуют внешние силы, это может привести к изменению скорости вращения, а вместе с ней и момента импульса l . Разложим силу \vec{F} на две составляющие: \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 10). Так как радиус окружности остается неизменным, на движение тела влияет только одна составляющая

$$F_1 = F \cdot \cos \alpha.$$

По второму закону Ньютона

$$\frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = F_1 = F \cdot \cos \alpha.$$

Умножая это равенство на радиус, получаем:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\Delta(mvr)}{\Delta t} = F \cdot r \cdot \cos \alpha = F \cdot d,$$

где d — плечо силы F (расстояние от оси вращения до прямой, вдоль которой действует сила). *Произведение силы на плечо называют моментом силы M* . Таким образом, последнее равенство можно переписать так:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = M, \text{ где } M = F \cdot d.$$

¹ Вообще говоря, момент l можно определить и в случае движения тела по произвольной траектории. Эту величину удобно считать вектором. Мы ограничиваемся простейшим случаем.

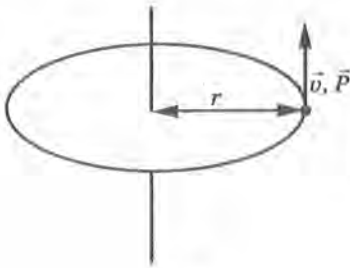


Рис. 9

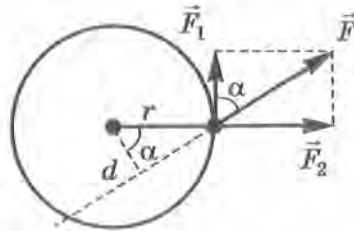


Рис. 10

В случае действия нескольких сил их моменты складываются.

Скорость изменения момента импульса материальной точки равна сумме моментов действующих на нее сил. Если суммарный момент силы равен нулю, момент импульса материальной точки сохраняется во времени.

§ 5. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси

1. При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси все его точки будут перемещаться по окружностям с центрами, лежащими на этой оси (рис. 11). Угловые скорости для всех точек тела будут одинаковы.

Полный момент импульса тела L складывается из моментов составляющих его материальных точек Δl :

$$L = \sum_i \Delta l_i.$$

Скорость изменения полного момента импульса определяется суммой моментов внешних сил, действующих на тело:

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \sum_i M_i^{(внеш)}.$$

Последнее равенство можно переписать в виде, напоминающем второй закон Ньютона. Для этого выразим момент импульса через угловую скорость ω , постоянную для всех точек тела:

$$L = \sum_i \Delta l_i = \sum_i \Delta m_i v_i r_i = \sum_i \Delta m_i \omega r_i^2 = \omega \sum_i \Delta m_i r_i^2.$$

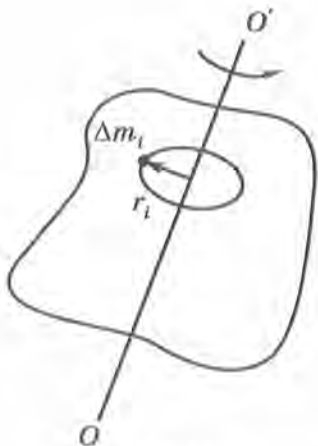


Рис. 11

Величина под знаком суммы называется *моментом инерции* тела и обозначается буквой I . С учетом этого имеем:

$$I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \sum M_i^{(\text{внеш})}.$$

По аналогии с обычным ускорением $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ величину

$\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ называют *угловым уско-*

рением. Аналогично тому, как сумма внешних сил определяет изменение скорости центра масс тела, сумма моментов сил «несет ответственность» за изменение угловой скорости его вращения.

2. Твердое тело может находиться в равновесии, если равны нулю суммы приложенных к нему внешних сил и их моментов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

<i>Глава 1.</i>	ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ	3
1.	Введение	3
2.	Основные положения молекулярно-кинетической теории	4
3.	Диффузия и броуновское движение	5
3а.	Силы взаимодействия между молекулами	7
4.	Строение газов, твердых тел и жидкостей	10
5.	Закон Авогадро. Атомная и молекулярная масса	11
6.	Число Авогадро	12
7.	Масса и размеры молекул	14
<i>Глава 2.</i>	МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	16
8.	Давление жидкостей и газов (повторение)	16
9.	Идеальный газ	17
10.	Как рассчитать давление газа на стенку	17
11.	Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	19
12.	Понятие о температуре	22
13.	Построение температурной шкалы	23
14.	Закон Шарля	24
15.	Абсолютная шкала температур	25
16.	Выражение закона Шарля через абсолютную температуру	26
17.	Связь абсолютной температуры с кинетической энергией молекул	27
18.	Уравнение Клапейрона—Менделеева	29
19.	Частные случаи уравнения состояния идеального газа	31
20.	Закон Дальтона	36
21.	Скорость теплового движения молекул	37
22.	Использование сжатых и разреженных газов	39

Глава 3. СВОЙСТВА ПАРОВ	41
23. Испарение и конденсация	41
24. Устройство бытового холодильника	43
25. Насыщенный пар	45
26. Кипение	48
27. Влажность	50
Глава 4. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ	52
28. Свойства поверхности жидкости	52
29. Поверхностное натяжение и способы его измерения	53
30. Давление под искривленной поверхностью жидкости	54
31. Явление смачивания и несмачивания	55
32. Капиллярные явления	56
Глава 5. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ	59
33. Кристаллические и аморфные тела	59
34. Плавление и отвердевание	61
35. Упругие деформации твердых тел. Закон Гука	63
36. Пластические деформации твердых тел	65
37. Предел прочности	66
38. Проблема создания новых материалов	66
Глава 6. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	69
39. Предмет термодинамики	69
40. Внутренняя энергия	69
41. Количество теплоты	71
42. Первое начало термодинамики	72
43. Закон сохранения энергии	72
44. Стандартная форма записи первого закона	73
45. Расчет количества переданного тепла в простейших случаях	74
46. Расчет работы газа	77
47. Адиабатный процесс	79
48. Применение первого начала термодинамики к различным процессам	83
49. Необратимость тепловых процессов	84
50. Принцип действия теплового двигателя	86
51. Невозможность вечного двигателя второго рода	89
52. Максимальный к. п. д. теплового двигателя	89
53. Основные типы тепловых двигателей	91
54. Тепловые двигатели и охрана природы	94

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

<i>Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ</i>	96
55. Введение	96
56. Электрические заряды	96
57. Электроскоп	99
58. Проводники и изоляторы	99
59. Распределение зарядов на проводниках	100
60. Закон Кулона	100
61. Закон сохранения заряда	105
62. Электрическое поле	106
63. Принцип суперпозиции	109
64. Поле — фундаментальное понятие.	111
65. Силовые линии	112
66. Поле заряженной сферы и плоскости	115
67. Опыт Иоффе—Милликена	120
68. Строение атома (повторение)	122
69. Электронный характер проводимости металлов	124
70. Проводники в электрическом поле.	125
71. Поле внутри проводника	126
72. Работа в электрическом поле	130
73. Потенциал.	132
74. Условия равновесия зарядов в проводниках	135
75. Разность потенциалов двух точек. Напряжение и его связь с напряженностью поля	136
76. Расчет потенциала в поле точечного заряда.	138
77. Измерение разности потенциалов между проводниками	142
78. Емкость конденсатора	144
79. Применение конденсаторов.	147
80. Энергия заряженного конденсатора	148
81. Диэлектрики в электрическом поле	149
82. Сводка формул электростатики	152
83. Закон Кулона в диэлектриках	154
<i>Глава 8. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА</i>	155
84. Электрический ток	155
85. Сила тока	155
86. Действия тока	157
87. Напряжение	157
88. Закон Ома для участка цепи	158
89. Расчет сопротивления проводника.	160
90. Сопротивление последовательной и параллельной цепи.	161
91. Задачи на последовательное и параллельное соединение	162

92.	Расчеты с помощью пропорций	165
93.	Потенциометр	166
94.	Каким должно быть сопротивление амперметра и вольтметра	167
95.	Увеличение пределов измерения вольтметра и амперметра	168
96.	Работа и мощность тока	171
97.	Закон Джоуля—Ленца	173
98.	Роль источника тока	176
99.	ЭДС источника и закон Ома для замкнутой цепи	177
100.	Как измерить ЭДС источника.	180
101.	Последовательное и параллельное соединение источников	181
102.	Короткое замыкание.	182
Глава 9. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.		185
103.	Понятие о магнитном поле	185
104.	О направлении вектора магнитной индукции и силы Лоренца.	186
105.	Определение величины магнитной индукции и расчет силы Лоренца	189
106.	Линии магнитной индукции	190
107.	Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле	194
108.	Сила, действующая на провод с током.	196
109.	Рамка с током в магнитном поле	199
110.	Использование в технике сил, действующих на токи.	202
111.	Магнитный поток	205
112.	Вещество в магнитном поле.	206
113.	Связь магнитных свойств вещества с внутриатомными токами	210
Глава 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.		212
114.	Природа тока в металлах	212
115.	Связь силы тока со скоростью движения зарядов	213
116.	Зависимость сопротивления металлов от температуры	215
117.	Сверхпроводимость	216
118.	Природа тока в собственном полупроводнике	217
119.	Применение термо- и фоторезисторов	220
120.	Примесная проводимость	222
121.	Электронно-дырочный переход.	223
122.	Влияние прямого и обратного напряжения.	226
123.	Полупроводниковый диод.	230

124.	Транзистор	231
125.	Электронная эмиссия	234
126.	Двухэлектродная лампа (диод)	236
127.	Вольт-амперная характеристика диода	238
128.	Электронно-лучевая трубка	239
129.	Электронный осциллоскоп	241
130.	Природа тока в электролитах	243
131.	Закон электролиза	246
132.	Как догадались о существовании элементарного заряда	247
133.	Применение электролиза	248
134.	Природа тока в газах	249
135.	Основные виды разряда при атмосферном давлении	251
136.	Тлеющий разряд	255
137.	Плазма	256
138.	МГД-генератор	257

Приложение **ДВИЖЕНИЕ АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО**

ТЕЛА 259

1.	Абсолютно твердое тело	259
2.	Равнодействующая сил, приложенных к твердому телу	261
3.	Движение центра масс абсолютно твердого тела	263
4.	Момент импульса материальной точки	264
5.	Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси	265

Приобрести книгу вы можете
в магазине «Книжный двор»
тел. 233-34-31

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ
Соловейчик Иосиф Абрамович

ФИЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ПОСОБИЕ ДЛЯ АБИТУРИЕНТОВ И СТАРШЕКЛАССНИКОВ

Заведующий редакцией *А.В. Барзилович*
Технический редактор *Н.А. Степанова*
Художник *С.И. Ващенко*
Редактор *А.С. Чирцов*

Подписано в печать 20.09.2006. Формат 84 x 108 ¹/₃₂.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,28. Тираж 300. Заказ № 3455

Издательство «ОРАКУЛ»
190068, Санкт-Петербург, пер. Бойцова, 4
Лицензия ЛР № 064792

Отпечатано с диапозитивов
в ГУП «Типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12