

ФИЗИКА

10

Часть 2

Учебник для 10 классов
естественно-математического направления
общеобразовательных школ

*Утверждено Министерством образования и науки
Республики Казахстан*



Алматы "Мектеп" 2019

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72
Ф50

Авторы:

**Б. А. Кронгарт, Д. М. Казахбаева,
О. Имамбеков, Т. З. Кыстаубаев**

Физика. Учебник для 10 кл. естеств.-матем. направления общеобразоват. шк. Часть 2 / Б.А.Кронгарт, Д.М.Казахбаева, О.Имамбеков, Т.З.Кыстаубаев. — Алматы: Мектеп, 2019. — 200 с. илл.

ISBN 978—601—07—1114—3

Ф $\frac{4306021200—044}{404(05)—19}$ 59(1)—19

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72

© Кронгарт Б.А., Казахбаева Д.М.,
Имамбеков О., Кыстаубаев Т.З., 2019
© Издательство “Мектеп”,
художественное оформление, 2019
Все права защищены
Имущественные права на издание
принадлежат издательству “Мектеп”

ISBN 978—601—07—1114—3



Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 10. Электростатика

Глава 11. Постоянный электрический ток

Глава 12. Электрический ток в различных
средах

Глава 13. Магнитное поле

Глава 14. Электромагнитная индукция



Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 10. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 49. Электрический заряд. Электризация. Закон сохранения электрического заряда



Ключевые понятия: электричество, электрический заряд, положительный и отрицательный заряды.

На этом уроке вы: познакомитесь с основными понятиями электростатики.

Слова “электричество”, “электрический заряд”, “электрический ток” знакомы нам с детства. Мы настолько к ним привыкли, что их значение кажется нам совершенно ясным. Но попробуйте ответить на вопрос: “Что такое *электрический заряд*?”, — и вы убедитесь, что это не так-то просто. Дело в том, что такие понятия, как *масса* и *заряд*, относятся к фундаментальным, и их четкое определение вообще невозможно.

Попробуем разобраться в сути понятия *электрический заряд*, опираясь на известные нам факты. Из курса физики для 8 классов вам известно, что все тела состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома и электронов, вращающихся вокруг него. Исследования физиков-ядерщиков показали, что ядро состоит из более мелких частиц — *протонов* и *нейтронов*. *Протоны, нейтроны и электроны* называются *субатомными частицами*. Эти частицы обладают индивидуальными свойствами и не похожи друг на друга. Для характеристики этих свойств было введено много физических величин, основными из которых являются *масса* и *электрический заряд*. Элементарные частицы при рождении наделяются строго индивидуальной массой и электрическим зарядом. Так, *заряд, аналогичный заряду электрона, стали называть отрицательным, а заряд, аналогичный заряду протона, — положительным*. Нейтрон не имеет электрического заряда. Наличие у частиц электрического заряда позволяет им взаимодействовать друг с другом. Причем, как показывает опыт, одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга, а разноименно заряженные — наоборот, притягиваются. Поэтому *электрический заряд характеризует интенсивность электромагнитных взаимодействий*. Электрический заряд не существует отдельно от частицы — это ее неотъемлемое свойство, так же, как и масса. Электрический заряд принято обозначать символом q .

Предлагаем вам порассуждать о том, какой на самом деле смысл скрыт под терминами “положительный” и “отрицательный” заряды. Что известно из опыта, что мы сами придумали для удобства?

Электрическому заряду присуще свойство *дискретности*, т. е. он способен дробиться, но только до определенного минимального значения, которое называется *элементарный заряд*. Принято обозначать элементарный заряд символом e . Величина элементарного заряда была определена экспериментально американским физиком Р.Э.Милликеном (1868—1953) и российским физиком А.Ф.Иоффе (1880—1960). Его численное значение равно: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Видно, что это очень малая величина.

Заряд макроскопических тел определяется суммарным зарядом частиц, из которых они состоят. Атом любого вещества нейтрален, так как число электронов в нем равно числу протонов в его ядре. Поэтому макроскопические тела, как правило, электрически нейтральны.

Для того чтобы макроскопическое тело стало обладать электрическим зарядом, необходимо отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного. Этот процесс называют электризацией.

Наэлектризовать тело можно:

- трением — при этом небольшая часть наиболее подвижных заряженных частиц в теле (электронов) перейдет от одного тела к другому, атомы которого притягивают их сильнее; первое тело зарядится положительно, второе — отрицательно;

- соприкосновением незаряженного тела с заряженным. При этом часть электронов будет перебегать от тела, у которого число электронов больше, к телу с меньшим числом электронов.

Совершенно ясно, что *электрический заряд при электризации ниоткуда не берется и никуда не исчезает бесследно. Он только переходит от одного тела к другому, а общий заряд в замкнутой системе тел остается величиной неизменной.* В этом состоит суть *закона сохранения электрического заряда*. Математически его можно записать так:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (49.1)$$

Замкнутой, или изолированной, называют такую систему, через границы которой не может проникнуть вещество.

Обнаружить, заряжено тело или нет, можно с помощью электроскопа, устройство и принцип действия которого знакомы нам из курса физики для 8 классов.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие частицы называются *элементарными*?
2. Что понимают под *электрическим зарядом*?
3. Что такое *дискретность заряда*?
4. Какой заряд называют *элементарным*? Почему?
5. Что такое *электризация*?
6. Как можно наэлектризовать тела?
7. Сформулируйте закон сохранения заряда.
8. Когда справедлив закон сохранения заряда?

Творческая мастерская

Наблюдайте

На нити висит бумажная гильза. Что будет происходить, если ее поместить между двумя металлическими дисками, заряженными зарядами противоположного знака?

Экспериментируйте

1. Прижмите газету к оконному стеклу и потрите ее щеткой. Что вы наблюдаете? Почему?
2. С помощью газеты наэлектризуйте стеклянную бутылку. Как определить знак заряда газеты и бутылки?

Объясните

1. От металлического шарика, имеющего заряд $10e$, отделили заряд $-5e$. Каким стал заряд шарика?
2. К шарiku, подвешенному на леске, подносят отрицательно заряженную палочку, и шарик притягивается к ней. Что можно сказать о заряде шарика?
3. Иногда быстро поднимающийся аэростат загорается в воздухе и неосторожное обращение с огнем не является этому причиной. Чем же объяснить возгорание аэростата?

Решайте

1. Пять заряженных шариков одинакового объема привели в соприкосновение друг с другом, в результате чего суммарный заряд этих шариков стал 10 нКл . Учитывая, что заряды первого и второго шариков до соприкосновения равны, соответственно, 1 нКл и -17 нКл , а заряды остальных шариков одинаковы, определите заряд четвертого шарика до соприкосновения.

(Ответ: 2 нКл)

2. Шарик, заряд которого $-6,4 \text{ нКл}$, соприкасается с нейтральным проводящим шариком того же размера. Сколько электронов перешло с заряженного шарика на незаряженный?

(Ответ: $2 \cdot 10^{10}$)

Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 50. Закон Кулона



Ключевые понятия: Закон Кулона, электрическая постоянная, диэлектрическая проницаемость, свойство суперпозиции.

На этом уроке вы познакомитесь с основным законом электростатики — законом Кулона, с принципом суперпозиции; научитесь рассчитывать силы взаимодействия точечных зарядов в вакууме или в среде.

Известно, что электрически заряженные тела взаимодействуют друг с другом, причем одноименно заряженные из них отталкиваются, а разноименно заряженные — притягиваются. Определить силу взаимодействия неподвижных заряженных тел экспериментально сумел французский физик Ш. О. Кулон, который с помощью крутильных весов установил, как взаимодействуют друг с другом маленькие заряженные шарики.

В 1785 г. Кулон экспериментально установил, что *два точечных неподвижных заряженных тела в вакууме взаимодействуют друг с другом с силой, прямо пропорциональной произведению модулей зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, и направленной по прямой, соединяющей эти заряды*. Эту силу называют *кулоновской*. Закон Кулона называют *основным законом электростатики*. Математически закон Кулона записывается так:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}. \quad (50.1)$$

Коэффициент k в формуле (50.1) определяется выбором системы единиц. Он показывает, с какой силой взаимодействуют друг с другом единичные заряды, находящиеся на единичном расстоянии друг от друга. В системе СИ значение коэффициента k равно $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$. (Подумайте, что означает это число.)

Обычно в системе СИ используется рационализированная запись законов электромагнитных явлений, в которой $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Постоянная ϵ_0 называется *электрической постоянной*: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2$. С учетом этого закон Кулона можно записать так:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}. \quad (50.2)$$

Введение множителя 4π упрощает запись основных уравнений электродинамики, установленных Максвеллом.

Необходимо помнить, что закон Кулона справедлив только для точечных зарядов. На самом деле точечных зарядов в природе не существует, но если расстояние между заряженными телами во много

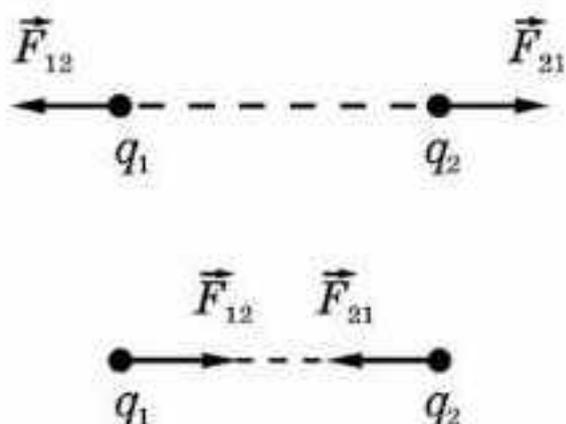


Рис. 50.1

раз больше их размеров, то эти тела можно считать точечными.

Закон Кулона (50.2) описывает и взаимодействие зарядов, движущихся со скоростями, значительно меньшими, чем скорость света, например, систему “электрон — протон” в атоме водорода.

Согласно третьему закону Ньютона, сила \vec{F}_{12} , действующая на заряд q_2 со стороны заряда q_1 , равна силе \vec{F}_{21} , действующей со стороны заряда q_2 на заряд q_1 , т. е. $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$. Если знаки зарядов одинаковы, то произведение $q_1 \cdot q_2 > 0$ — это означает, что заряды отталкиваются. Если знаки зарядов противоположны, то произведение $q_1 \cdot q_2 < 0$, и это означает, что заряды притягиваются (рис. 50.1). Эксперименты подтверждают, что одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименно заряженные — притягиваются.

В системе СИ единица заряда производная. Ее устанавливают, используя основную единицу силы тока — 1 А (*ампер*), эталон которой устанавливают на основе взаимодействия токов.

Кулон (Кл) — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока в 1 А:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с.}$$

Помещая точечные заряды в различные диэлектрики, установили, что сила взаимодействия между ними уменьшается, причем отношение силы взаимодействия F_0 зарядов в вакууме к силе взаимодействия F этих же зарядов на том же расстоянии в среде не зависит ни от самих зарядов, ни от расстояния между ними. Оно определяется только свойствами самой среды. Тогда

$$\frac{F_0}{F} = \varepsilon = \text{const.}$$

Величину ε называют *относительной диэлектрической проницаемостью среды*.

Диэлектрическая проницаемость среды — это физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме. Она является безразмерной величиной.

Свойство суперпозиции. Из опыта следует, что сила взаимодействия между двумя зарядами не зависит от присутствия других зарядов. Поэтому независимо от числа зарядов уравнение (50.1) можно использовать

для вычисления сил F_1, F_2, \dots, F_n , действующих на данный заряд q_0 со стороны остальных зарядов q_1, q_2, \dots, q_n . Отсюда можно заключить, что результирующая сила F_0 , действующая на данный заряд q_0 , равна векторной сумме сил:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \quad (50.3)$$

Это утверждение носит название *свойства суперпозиции*, или *свойства наложения*. Свойство суперпозиции используется в электростатике при рассмотрении взаимодействий тел, которые нельзя считать точечными. Для этого каждое тело следует мысленно разбить на достаточно малые части — так, чтобы каждую из них можно было рассматривать как точечный заряд. После этого, используя закон Кулона, вычислим силы, действующие между малыми частями двух тел, и векторно сложим их. Силы, действующие на каждое из тел, получатся тем точнее, чем меньше будут составные части, на которые мы разбивали тела. В пределе нужно брать бесконечно малые объемы, чтобы получить точный ответ.



Вопросы для самоконтроля

1. Какой заряд называется *точечным*?
2. Сформулируйте закон Кулона.
3. Как был открыт закон Кулона?
4. В каких единицах измеряется электрический заряд?
5. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости среды?
6. Почему была введена электрическая постоянная?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции.

Творческая мастерская

Наблюдайте

Подвесьте две одноименно заряженные бумажные гильзы на шелковые нити и поднесите их друг к другу. Что наблюдаете? Что произойдет, если между ними поместить лист керамики или лист картона? Объясните результаты.

Экспериментируйте

1. К шару заряженного электроскопа поднесите, не касаясь его, незаряженное металлическое тело. Как изменится отклонение лепестков электроскопа? Почему?

2. К шару заряженного электроскопа поднесите, не касаясь его, заряженное металлическое тело. Как изменится отклонение лепестков электроскопа в зависимости от знака заряда тела? Почему?

Объясните

Почему при расчесывании волос пластмассовым гребнем они "прилипают" к гребню? Как изменится результат, если воздух в комнате сильно увлажнить?

Решайте

1. Заряженные шарики, общий заряд которых равен 2 нКл, находятся в 3 м друг от друга в воздухе и взаимодействуют с силой 1 Н. Как распределен заряд между шариками?

(Ответ: 1,865 нКл и 0,135 нКл)

2. Два одинаковых металлических шарика зарядили так, что заряд одного из них в $n = 5$ раз больше другого. Шарики привели в соприкосновение и раздвинули на расстояние, большее в 1,34 раза. Во сколько раз изменится модуль силы их взаимодействия, если заряды: а) одноименные; б) разноименные?

(Ответ: а) не изменится; б) уменьшится в 2,25 раза)

*3. Два заряженных шарика с равными радиусами и массами, подвешенные на нитях одинаковой длины, опускают в жидкий диэлектрик. Угол расхождения нитей в воздухе и в диэлектрике оказался одним и тем же. Плотность материала шариков равна $1,2 \text{ г/см}^3$, а плотность диэлектрика $0,8 \text{ г/см}^3$. Определите проницаемость диэлектрика.

(Ответ: 3)

4. Чтобы иметь представление о величине заряда 1 Кл, определите силу, с которой будут взаимодействовать два точечных заряда по 1 Кл в вакууме на расстоянии 1 м; в воде на таком же расстоянии.

(Ответ: $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$; $0,1 \cdot 10^9 \text{ Н}$)

5. На расстоянии 1 м друг от друга расположены два тела с положительными зарядами $2 \cdot 10^{-5}$ и $4,5 \cdot 10^{-5}$ Кл. На каком расстоянии от тела с большим зарядом помещен пробный заряд, если последний находится в равновесии?

(Ответ: 0,6 м)

6. Два отрицательных точечных заряда находятся в вакууме на расстоянии 48 см и взаимодействуют с силой 10^{-3} Н. Сколько электронов содержится в каждом заряде?

(Ответ: 10^{12} электронов)

7. Два одинаковых по величине и знаку точечных заряда, расположенных на расстоянии 3,0 м друг от друга в вакууме, отталкиваются с силой 0,40 Н. Определите величину каждого заряда.

(Ответ: $2 \cdot 10^{-5}$ Кл)

8. С какой силой взаимодействуют два заряда $0,66 \cdot 10^{-7}$ Кл и $1,1 \cdot 10^{-3}$ Кл в воде на расстоянии 3,3 см? На каком расстоянии их следует поместить в вакууме, чтобы сила взаимодействия осталась прежней?

(Ответ: 7,4 Н; 0,297 м)

■9. Имеются три одинаковых заряда по $3 \cdot 10^{-8}$ Кл, каждый из которых расположен в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд необходимо поместить в центр этого треугольника, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

(Ответ: $1,73 \cdot 10^{-8}$ Кл)

*10. Две частицы, имеющие массу m и заряд q , находятся в вершинах равностороннего треугольника, составленного из легких нитей длиной l (рис. 50.2). Систему поднимают вертикально вверх с ускорением \vec{a} , равным по модулю g . Определите натяжение нити, соединяющей частицы.

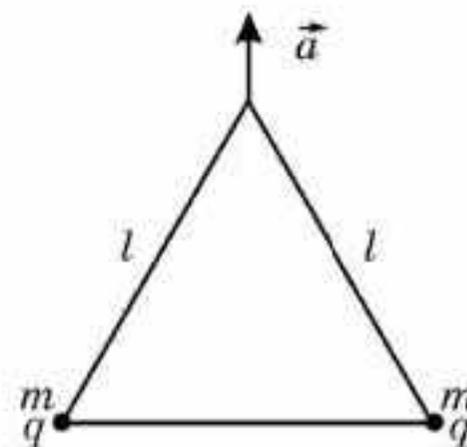


Рис. 50.2

(Ответ: $\left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 l^2} - \frac{2\sqrt{3}}{3} mg \right)$)



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 51. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Силовые линии электрического поля



Ключевые понятия: электрическое поле, напряженность электрического поля, силовые линии электрического поля, принцип дальнего действия.

На этом уроке вы: познакомитесь с электрическим полем, научитесь рассчитывать напряженность электрического поля, используя принцип суперпозиции, изображать электрическое поле с помощью силовых линий.

Из формулы (51.1) следует, что при смещении заряда q_2 сила определяется расстоянием между зарядами в один и тот же момент времени, т. е. взаимодействие заряженных частиц осуществляется мгновенно, непосредственно через пустое пространство. В этом состоит так называемый *принцип дальнего действия*, сторонником которого был Кулон. Выдающийся английский физик М. Фарадей первым выступил против теории дальнего действия. Он искал причину и реального переносчика взаимодействия зарядов. Фарадей был глубоко убежден в том, что материя не может действовать там, где ее нет. Он исходил из концепции

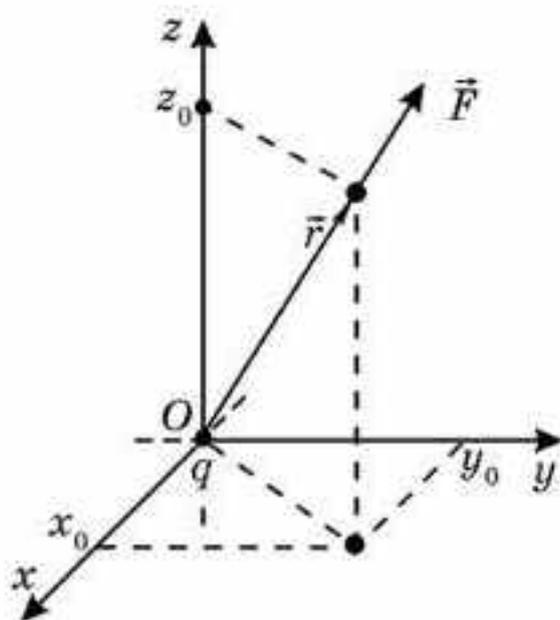


Рис. 51.1

близкого действия, предполагая, что наличие заряда в теле изменяет свойства окружающего его пространства (в пространстве возникает электрическое поле). А взаимодействие зарядов осуществляется через создаваемое ими в пространстве электрическое поле. Для описания поля Фарадей в 30-х годах XIX в. ввел понятие *силовые линии*, определяющие силу, действующую на заряды. Идеи Фарадея о реальности полей получили развитие в трудах Максвелла.

Поместим заряд q в начало координат (рис. 51.1) и проведем опыт по измерению сил, действующих на заряды q_1, q_2, \dots, q_n , которые будем помещать по очереди в некоторую точку пространства с координатами $(x_0; y_0; z_0)$. В результате получим ряд значений $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$. Обработка опытных данных говорит, что *отношения $\frac{\vec{F}_n}{q_n}$ одинаковы и равны постоянному вектору* :

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \vec{E}_0.$$

Теперь повторим опыт несколько раз, помещая заряды в новые точки пространства. Для каждой точки получим:

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \vec{E}_0(x; y; z). \quad (51.1)$$

Поскольку правая часть не зависит от q_0 , то мы приходим к выводу, что отношение $\frac{\vec{F}}{q_0}$ характеризует нечто, существующее в данной точке, безотносительно к заряду q_0 , помещаемому в эту точку.

$$\vec{E}(x; y; z) = \frac{\vec{F}(x; y; z)}{q_0}. \quad (51.2)$$

Вектор \vec{E} называют еще *напряженностью электрического поля, создаваемого зарядом q* .

С другой стороны, если вектор напряженности электрического поля известен, то сила, действующая на заряд, помещенный в точку с координатами $(x; y; z)$, будет равна $\vec{F}(x; y; z) = q_0 \vec{E}(x; y; z)$. Таким образом, понятие *поле* позволяет перейти к другому способу описания электрического взаимодействия. Вместо того чтобы говорить о том, что заряд q действует с силой \vec{F} на заряд q_0 , можно сказать, что заряд q создает электрическое поле, а на заряд, находящийся в этом поле, действует сила, равная \vec{F} .

Полевой способ описания взаимодействия оказался очень плодотворным для развития физики, так как при описании электромагнитных явлений существенными оказываются только свойства самого поля. Различие же источников поля несущественно.

Поясним теперь, почему электрическое поле является одним из видов материи, самостоятельной физической реальностью. Если изменить положение заряда q , то напряженность поля в том месте, где находится заряд q_0 , изменится: электрическое поле системы зарядов q_0 и q должно перестроиться.

При перемещении заряда q поле изменится сначала в ближайшей к нему “окрестности”. Приращение напряженности поля будет распространяться со скоростью света c . Таким образом, сила \vec{F} , действующая на заряд q_0 , изменится не мгновенно, а лишь через некоторый промежуток времени, с запаздыванием. Далее мы увидим, что электрическое поле, как и частицы, обладает энергией.

Напряженность поля точечного заряда. Подставляя в формулу (51.2) выражение для силы $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$, действующей на заряд q , получим:

$$E = k \frac{q}{r^2}. \quad (51.3)$$

Электрическое поле неподвижных зарядов называется электростатическим. Формула (51.3) определяет напряженность поля точечного заряда. Направление вектора совпадает с направлением силы, действующей на пробный точечный положительный заряд. Поэтому, если $q > 0$, то вектор напряженности направлен от заряда; если $q < 0$, то вектор

\vec{E} направлен к заряду. Величина же напряженности электрического поля, создаваемого изолированным зарядом q на расстоянии r , равна $E = k \frac{q}{r^2}$. В СИ единица напряженности $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$ (вольт на метр).

Напряженность поля системы зарядов. Рассмотрим систему неподвижных дискретных зарядов q_1, q_2, \dots и найдем напряженность поля, создаваемого системой в некоторой точке пространства. Помещая в эту точку заряд q_0 , найдем, согласно формуле (51.2), действующую на него силу \vec{F}_0 . Далее определим напряженность \vec{E} , создаваемую системой зарядов в искомой точке, соотношением:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0}. \quad (51.4)$$

Подставляя выражение (51.3) в формулу (51.4), получим:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (51.5)$$

Следовательно, векторы напряженности, как и векторы сил, действующих на заряд q_0 , обладают свойством *суперпозиции*. Отсюда можно заключить, что *напряженность поля, создаваемого системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности*. Сила, действующая на заряд q в любом электростатическом поле напряженностью \vec{E} , равна:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (51.6)$$

Сила \vec{F} , с которой поле воздействует на заряд, является векторной величиной. Следовательно, напряженность поля \vec{E} также является векторной величиной:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}. \quad (51.7)$$

Единицей напряженности электрического поля, как это вытекает из формулы (51.7), является ньютон на кулон (Н/Кл).

Подумайте над тем, как можно использовать принцип суперпозиции для определения поля не точечных, а протяженных тел.

Силовые линии. В общем случае электрическое поле имеет сложную структуру. Для большей наглядности можно изобразить поле графически с помощью силовых линий. *Силовой линией называется такая линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением напряженности поля в этой точке.* Поэтому силовые линии направлены от положительных зарядов к отрицательным. Величина напряженности поля при таком способе изображения пропорциональна числу силовых линий, пересекающих единицу площади, расположенной поперек линий.

Силовые линии обладают следующими свойствами:

1. *Они непрерывны* — выходят из положительного заряда и входят в отрицательный заряд или уходят в бесконечность.

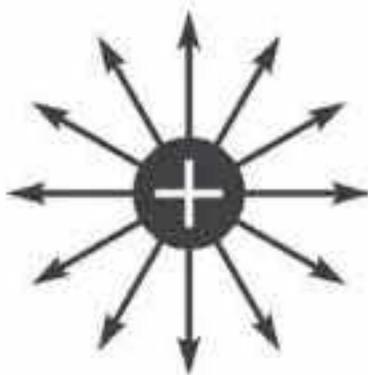


Рис. 51.2

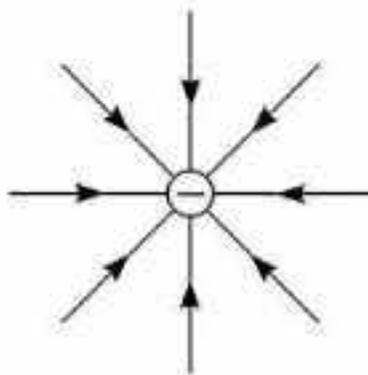


Рис. 51.3

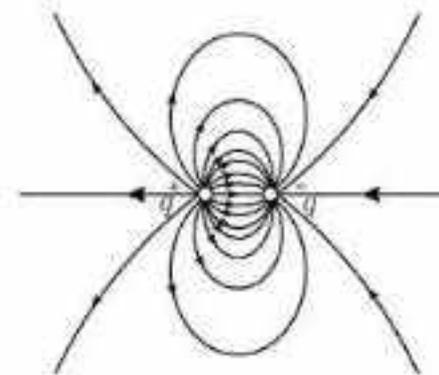


Рис. 51.4

2. *Нигде не пересекаются.* Если бы они пересекались, то в точке пересечения вектор напряженности имел бы два различных направления.

Обычно при графическом изображении поля густота силовых линий определяет величину вектора напряженности. При этом одна силовая линия на единицу площади, перпендикулярной линии, соответствует единице напряженности (рис. 51.2—51.7).

Однородное поле. Возьмем одинаковые металлические пластины и расположим их параллельно друг другу, как показано на рисунке 51.6. Если одной пластине сообщить заряд $+q$, а другой $-q$, то между ними возникнет электрическое поле. Линии напряженности этого поля окажутся параллельными, если расстояние между пластинами мало по сравнению с их линейными размерами. Плотность линий напряженности в поле между пластинами всюду одинакова и, следовательно:

$$\vec{E} = \text{const.}$$

Электрическое поле, векторы напряженности которого одинаковы во всех точках, называется однородным. Однородным можно считать только поле в середине пространства между пластинами, так как у краев пластины векторы \vec{E} в различных точках поля оказываются неодинаковыми.

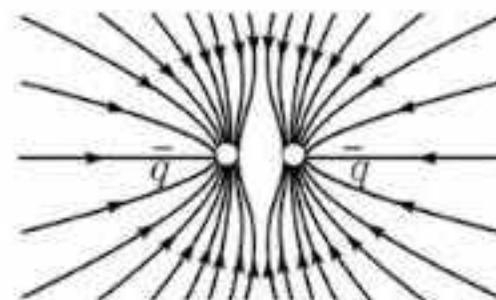


Рис. 51.5

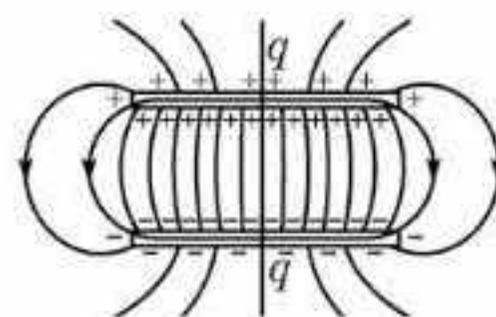


Рис. 51.6

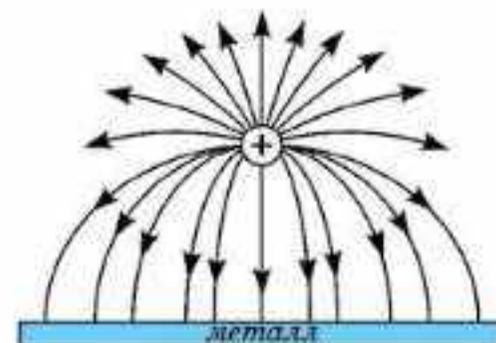


Рис. 51.7



Вопросы для самоконтроля

1. Каким образом объясняют взаимодействие электрических зарядов теории дальнего действия и ближнего действия?
2. Каково основное свойство электрического поля?
3. Что понимают под *напряженностью электрического поля*?
4. Какое поле называется *электростатическим*?
5. Объясните картину силовых линий, изображенных на рисунках 51.4—51.7?
6. Каким образом по картине силовых линий можно судить о направлении и модуле напряженности электрического поля в данной точке?

Примеры решения задач

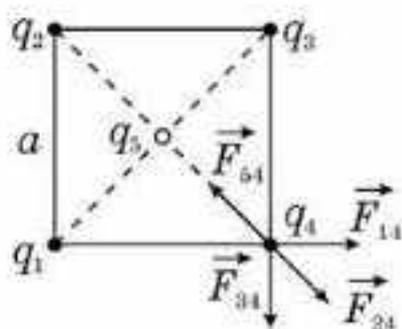


Рис. 51.8

1. В вершинах квадрата расположены одинаковые заряды q (рис. 51.8). Определить силу, действующую на каждый заряд. Сторона квадрата a . Какой заряд надо поместить в центре квадрата, чтобы вся система была в равновесии?

Решение. а) Так как каждый заряд находится в поле остальных зарядов, то со стороны этих зарядов на него действуют кулоновские силы отталкивания.

Сила, действующая на каждый заряд, может быть определена как векторная сумма всех сил: $\vec{F} = \vec{F}_{14} + \vec{F}_{24} + \vec{F}_{34}$.

Скалярная величина силы определяется по закону Кулона:

$$F_{14} = F_{34} = \frac{kq^2}{a^2}; \quad F_{24} = \frac{kq^2}{2a^2}; \quad F = F_{24} + \sqrt{F_{14}^2 + F_{34}^2}; \quad F = \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2}).$$

б) Чтобы система находилась в равновесии, все силы должны компенсировать друг друга, т. е. $F = F_{54}; \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2}) = \frac{kq|q_5|}{\left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2}; |q_5| = \frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2})$.

$$q_5 = -\frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2}).$$

Ответ: а) $F = \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2});$ б) $q_5 = -\frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2}).$

2. Два маленьких одинаковых металлических шарика несут разноименные заряды $+q$ и $-5q$. Шарик привели в соприкосновение и раздвинули на прежнее расстояние. Как изменился модуль силы взаимодействия шариков?

Дано:

$$q_1 = +q$$

$$q_2 = -5q$$

$$\frac{F_1}{F_2} = ?$$

Решение. Между двумя разноименно заряженными шариками действует кулоновская сила притяжения

$$F_1 = \frac{kq \cdot |-5q|}{r^2} = \frac{5kq^2}{r^2}. \text{ Когда шарик привели в соприкосновение, произошло перераспределение зарядов.}$$

Так как эти шарик одинаковые, то заряды у них выравниваются:

$$q_1' = q_2' = \frac{q + (-5q)}{2} = -2q \text{ и тогда } F_2 = \frac{k \cdot |-2q| \cdot |-2q|}{r^2} = \frac{4kq^2}{r^2}; \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{5}{4};$$

$$F_2 = \frac{F_1}{1,25}.$$

3. Медный шарик диаметром 0,1 см, имеющий заряд 1 нКл, помещен в масло. Какое расстояние и в каком направлении пройдет шарик за 1 с, если вся система находится в однородном, направленном вертикально

вверх поле 10 кН/Кл ? Сопротивлением среды пренебречь. Начальная скорость шарика равна нулю.

Дано:

$$d = 0,1 \text{ см} = 10^{-3} \text{ м}$$

$$q = 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\rho_{\text{ж}} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{м}} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$E = 10 \text{ кН/Кл} = 10^4 \text{ Н/Кл}$$

$$v_0 = 0$$

$$s = ?$$

$$\text{Решение. } s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{at^2}{2}.$$

Для определения s нужно знать ускорение \vec{a} , которое можно найти из основного уравнения динамики: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{э}} + \vec{F}_A$ (рис. 51.9). В проекции на ось Oy :

$$ma = mg - F_{\text{э}} - F_A;$$

$$F_{\text{э}} = qE; \quad F_A = \rho_{\text{ж}} g V = \rho_{\text{ж}} g \frac{4}{3} \pi r^3;$$

$$m = \rho_{\text{м}} V = \rho_{\text{м}} \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Подставим значения всех сил в скалярное уравнение и выразим ускорение:

$$ma = mg - F_{\text{э}} - F_A = \rho_{\text{м}} g \frac{4}{3} \pi r^3 - qE - \rho_{\text{ж}} g \frac{4}{3} \pi r^3.$$

$$\text{Тогда } a = \frac{\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{м}} g r^3 - qE - \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{ж}} g r^3}{\frac{4}{3} \pi \rho_{\text{м}} r^3} = 0,68 \text{ м/с}^2;$$

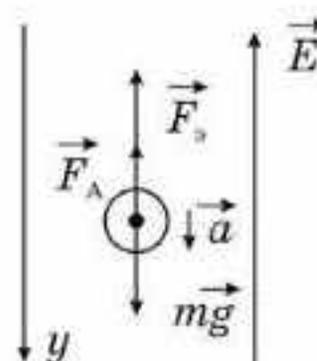


Рис. 51.9

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{0,68}{2} = 0,34 \text{ (м)}.$$

Ответ: $s = 0,34 \text{ м}$, вниз.

4. Два одинаковых одноименно заряженных шарика, подвешенных на нитях равной длины, опускают в керосин. При этом угол расхождения нитей не меняется. Какова плотность материала шариков?

Дано:

$$\varepsilon_1 = 1$$

$$\rho_{\text{к}} = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\varepsilon_2 = 2$$

$$\rho = ?$$

Решение. Систему отсчета (ИСО) совместим с землей. Координатные оси направим как показано на рисунке 51.10.

Так как шарики одинаковы и находятся в одинаковых положениях, то достаточно исследовать положение равновесия любого из них. В обоих случаях, например, на правый шарик действуют:

$m\vec{g}$ — сила тяжести; $\vec{F}_{\text{Н1}}$, $\vec{F}_{\text{Н2}}$ — силы натяжения нити; \vec{F}_1 , \vec{F}_2 — силы электростатического отталкивания (кулоновские силы); \vec{F}_A — сила Архимеда со стороны жидкости. Силой Архимеда в воздухе пренебрегаем из-за того, что $\rho_{\text{воз}} \ll \rho_{\text{ш}}$.

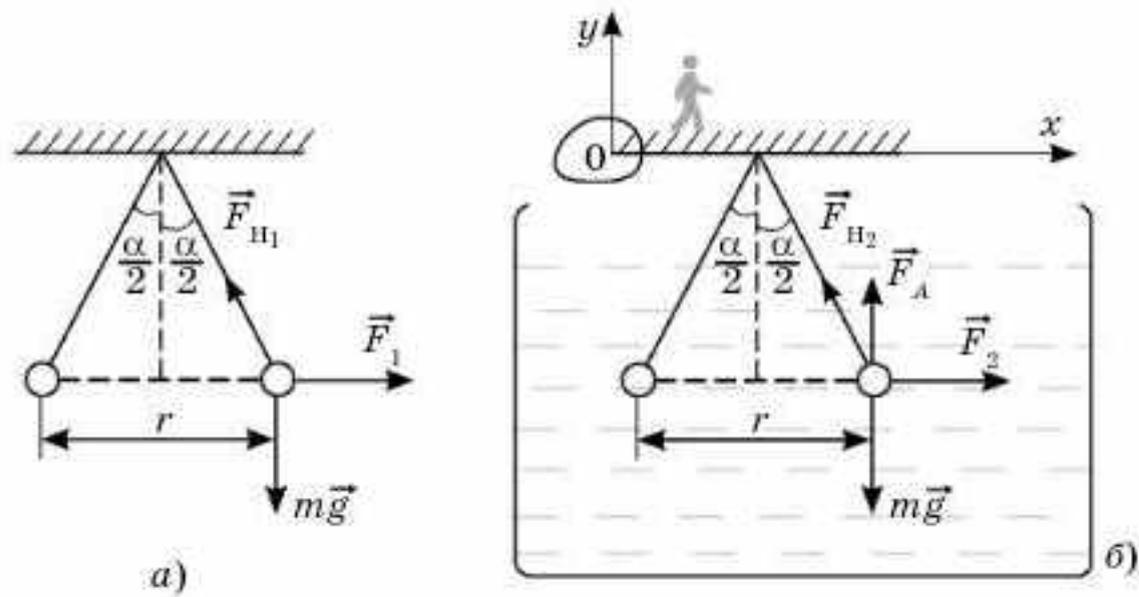


Рис. 51.10

Запишем условие равновесия (рис. 51.10 а, б) шарика в проекциях на выбранные оси в первом и втором случаях.

1-й случай:

$$F_1 - F_{H1} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0 \text{ (по оси } Ox); \quad F_{H1} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - mg = 0 \text{ (по оси } Oy).$$

2-й случай:

$$F_2 - F_{H2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0 \text{ (по оси } Ox); \quad F_{H2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + F_A - mg = 0 \text{ (по оси } Oy).$$

Составим системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F_{H1} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= F_1, \\ F_{H1} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= mg; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{H2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= F_2, \\ F_{H2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= mg - F_A \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Разделив первые уравнения на вторые в каждой системе (1) и (2) получим

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{F_1}{mg} = \frac{F_2}{mg - F_A}, \quad (3)$$

так как $F_1 = \frac{kq \cdot q_2}{\epsilon_1 r^2}$, а $F_2 = \frac{kq \cdot q_2}{\epsilon_2 r^2}$ и $F_{A2} = \rho_k V$, а $m = \rho V$, то (3) пере-

пишется так: $\frac{kq \cdot q_2}{\epsilon_1 r^2 mg} = \frac{kq \cdot q_2}{\epsilon_2 r^2 (mg - F_A)}$; или $1 - \frac{F_A}{mg} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$; тогда $\frac{\rho_k V}{\rho V} = 1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$.

$$\text{Отсюда } \rho = \frac{\rho_k}{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$



Творческая мастерская

Наблюдайте

Электризация тел трением. Подвесьте на шелковой нити легкую бумажную гильзу. Потрите о шелковую материю стеклянную палочку и поднесите ее к бумажной гильзе. Наблюдайте, что происходит.

Экспериментируйте

1. Зарядите электроскоп и зафиксируйте положения лепестков. Соедините его с помощью проводника (изолированного от вашей руки) с другим незаряженным электроскопом. Еще раз зафиксируйте положения лепестков электроскопов. Один из электроскопов разрядите и снова повторите опыт. Сделайте выводы.

2. Если к заряженному металлическому шарикуну прикоснуться пальцем, он теряет практически весь заряд. Почему?

Исследуйте

Исследуйте зависимость напряженности электрического поля заряженного шара от расстояния. Для этого внесите в поле заряженного шара маленький одноименно заряженный шарик, подвешенный на нити. Далее записывайте угол отклонения в зависимости от расстояния между центрами шариков. Постройте график зависимости. Сделайте соответствующие теоретические расчеты. Определите вид зависимости $E = E(r)$.

Объясните

Чему равна напряженность электрического поля в центре равномерно заряженной сферы?

Рассуждайте

Иногда говорят, что силовые линии электростатического поля — это траектории, по которым двигался бы положительный заряд, внесенный в это поле и предоставленный самому себе. Верно ли это утверждение?

Решайте

1. Нарисуйте качественную картину силовых линий электрического поля: а) двух разноименно заряженных плоскостей, причем $q_1 = q_2$; б) двух точечных зарядов, причем $q_1 = -2q_2$.

2. Какое ускорение получит электрон, попавший в электрическое поле напряженностью $0,2 \text{ МВ/м}$?

3. На каком расстоянии от заряда 8 мкКл напряженность поля равна 800 кВ/м ?

4. В однородном электрическом поле в вакууме находится пылинка массой 400 нг , обладающая зарядом 16 пКл . Какой должна быть по модулю и направлению напряженность поля, чтобы пылинка оставалась в равновесии?

5. На расстоянии 3 см от заряда 4 нКл , находящегося в жидком диэлектрике, напряженность поля равна 20 кВ/м . Какова диэлектрическая проницаемость диэлектрика?

■ 6. Атом водорода состоит из положительного ядра, вокруг которого вращается единственный электрон. С какой частотой должен обращаться электрон вокруг ядра,

чтобы не упасть на ядро, если его орбита — окружность с радиусом $3 \cdot 10^{-8}$ см? Масса электрона равна $9 \cdot 10^{-28}$ г.

(Ответ: $5 \cdot 10^{17}$ Гц)

7. На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону, причем сила электрического отталкивания капелек уравнивает силу их взаимного тяготения. Каковы радиусы капелек?

(Ответ: 76 мкм)

8. Расстояние между точечными зарядами $9 \cdot 10^{-6}$ и 10^{-6} Кл равно 8 см. На каком расстоянии от первого заряда напряженность поля равна нулю?

(Ответ: 6 см)

■9. На окружности радиусом 10 см на одинаковом расстоянии друг от друга расположены три точечных заряда $q_1 = q_2 = 10^{-8}$ Кл и $q_3 = -10^{-8}$ Кл. Определите напряженность поля в центре окружности.

(Ответ: $1,8 \cdot 10^4$ В/м)

10. Поле в глицерине образовано точечными зарядами $7,0 \cdot 10^{-8}$ Кл. Какова напряженность поля в точке, отстоящей от заряда на расстоянии 7,0 см?

(Ответ: 3,0 кВ/м)

11. В какую среду помещен точечный электрический заряд $4,5 \cdot 10^{-7}$ Кл, если на расстоянии 5,0 см от него напряженность поля равна $2,0 \cdot 10^4$ В/м?

(Ответ: В воду)

■12. На одинаковом расстоянии a друг от друга расположены три одинаковых равных заряда q . Какова напряженность поля в центре треугольника, образованного этими зарядами? Чему будет равна напряженность, если один из зарядов будет иметь противоположный знак?

(Ответ: $\left(0; \frac{3q}{2\pi\epsilon_0 a^2}\right)$)

Анализируйте

1. Два одинаковых по величине заряда находятся на некотором расстоянии друг от друга. В каком случае напряженность в точке, лежащей на половине расстояния между ними, больше: если эти заряды одноименные или разноименные? Приведите расчеты.

2. Как изменится сила взаимодействия двух одинаковых металлических шариков, если они вначале были заряжены одноименными зарядами различной величины, затем их привели в соприкосновение и раздвинули? Свои выводы подкрепите расчетами.

3. Изменится ли напряженность однородного электрического поля между двумя заряженными плоскостями, если расстояние между ними увеличить в два раза?

Творите

Придумайте задачу на суперпозицию (наложение) электрических полей.

Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 52. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса



Ключевые понятия: поток вектора напряженности, теорема Гаусса, поверхностная, линейная и объемная плотности заряда.

На этом уроке вы: познакомитесь с понятием потока напряженности электрического поля; научитесь применять теорему Гаусса для определения напряженности электрического поля шара, плоскости.

Рассмотрим подробнее картину силовых линий электрического поля неподвижного уединенного точечного заряда. Они представляют собой симметрично расположенные радиальные линии (рис. 52.1), выходящие из местонахождения заряда. Пусть число этих линий N . Тогда число линий, пересекающих единицу поверхности сферы радиусом r (т. е. густота силовых линий на расстоянии

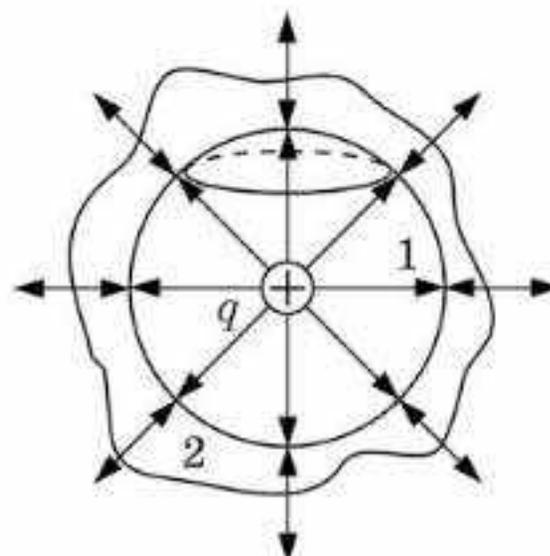


Рис. 52.1

от заряда), равно $\frac{N}{4\pi r^2}$. Сравнивая это соотношение с напряженностью поля точечного заряда $E = \frac{kq}{r^2}$, мы видим, что густота линий пропорциональна напряженности электрического поля. Но тогда эти два выражения можно сделать равными, выбрав надлежащим образом полное число силовых линий: $\frac{N}{4\pi r^2} = k \frac{kq}{r^2}$, отсюда получим:

$$N = 4\pi kq. \quad (52.1)$$

Из последнего выражения следует, что через поверхность сферы любого радиуса, охватывающую точечный заряд q , проходит одно и то же число силовых линий. А это значит, что силовые линии *непрерывны*. Тогда и через *любую замкнутую поверхность 2* (рис. 52.1), охватывающую заряд q , проходит такое же число силовых линий.

Так возникла необходимость введения новой физической величины — *поток напряженности электрического поля N* , который зависит не от напряженности поля в данной точке, а от распределения поля по поверхности той или иной площади.

Выделим в электрическом поле малый элемент площадью S , в каждой точке которого напряженность поля одинакова. Проведем нормаль \vec{n} к этому элементу. Угол между векторами \vec{E} и \vec{n} обозначим через α (рис. 52.2). Тогда число силовых линий N , пересекающих площадку S , будет равно:

$$N = E_n S = E S \cos \alpha. \quad (52.2)$$

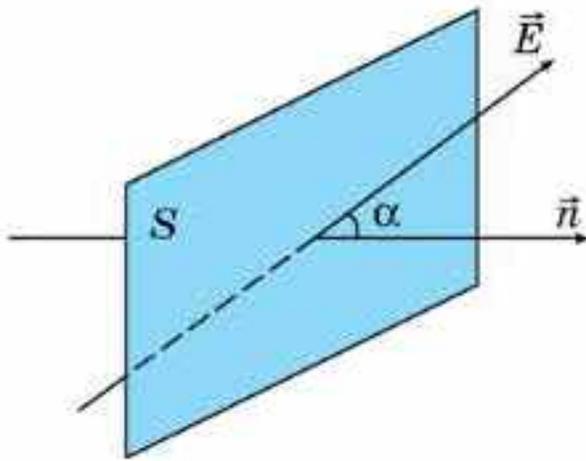


Рис. 52.2

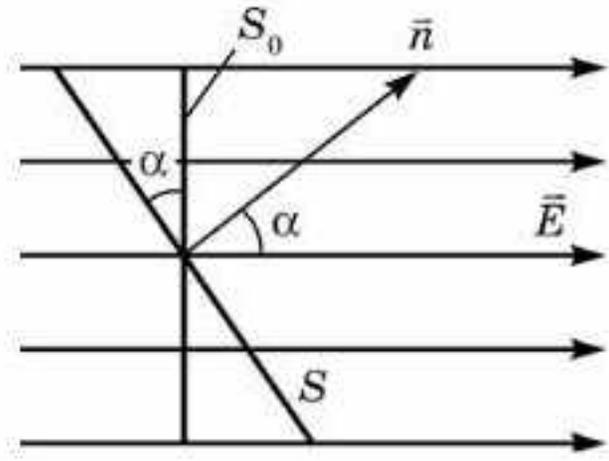


Рис. 52.3

Отсюда следует, что *поток напряженности электрического поля можно представить себе как величину, показывающую, какое число силовых линий пронизывает данный элемент поверхности*. Линии, пронизывающие элемент S , пронизывают и элемент S_0 , представляющий собой проекцию элемента S на плоскость, перпендикулярную вектору напряженности \vec{E} (рис. 52.3). Поток вектора напряженности поля — величина скалярная. Он может быть как положительным, так и отрицательным.

Поток напряженности поля через произвольную поверхность представляет собой сумму потоков через элементарные площадки, на которые эту поверхность можно разбить. Поэтому можно утверждать, что *поток напряженности поля точечного заряда q через любую замкнутую поверхность, охватывающую этот заряд, равен числу силовых линий, выходящих из данной поверхности, т. е. $4\pi kq$* . Если заряд внутри этой поверхности положителен, то вектор нормали к элементарным площадкам следует направлять наружу, если отрицателен — внутрь.

Если внутри замкнутой поверхности находится несколько зарядов, то в соответствии с принципом суперпозиции потоки напряженностей этих полей будут складываться, полный поток будет равен $4\pi kq$, где q — алгебраическая сумма всех зарядов, находящихся внутри поверхности.

Если внутри замкнутой поверхности электрических зарядов нет, то полный поток напряженности электрического поля через эту поверхность равен нулю. А это означает, что *какое число силовых линий входит в данный объем, такое же число и выходит наружу*.

Теорема Гаусса: *поток вектора напряженности электрического поля в вакууме через любую замкнутую поверхность пропорционален полному заряду, находящемуся внутри этой поверхности.*

Математически это записывается так:

$$N = 4\pi kq. \quad (52.3)$$

Так как в системе СИ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, поэтому поток напряженности электрического поля через замкнутую поверхность может быть найден по формуле:

$$N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (52.4)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды.

Используя теорему Гаусса, можно легко вычислять напряженности электрических полей, создаваемые заряженными телами произвольной формы.

Поле заряженного металлического шара. Окружим заряженный шар концентрической поверхностью, радиус которой равен расстоянию от центра шара до той точки, где необходимо вычислить напряженность поля. Согласно определению, поток напряженности определяем по формуле:

$$N = E_r S = 4\pi r E.$$

В то же время, согласно теореме Гаусса, этот же поток равен $N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$. Тогда интересующую нас напряженность электрического поля вне шара ($r > R$) можно рассчитать по формуле:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (52.5)$$

Видно, что напряженность поля вне шара такая же, как у поля точечного заряда, помещенного в центр шара. Напряженность поля внутри шара равна нулю, так как весь заряд шара находится на его поверхности, т. е. вне мысленно проводимой нами сферы ($r < R$).

Поле бесконечной равномерно заряженной плоскости. Силовые линии бесконечной заряженной плоскости представляют собой прямые перпендикулярные плоскости, начинающиеся на плоскости (рис. 52.4). Другими словами, поле плоскости является однородным.

В качестве замкнутой поверхности для применения теоремы Гаусса выберем поверхность цилиндра, образующая которого параллельна силовым линиям, а основания имеют площади, параллельные заряженной плоскости и лежащие по обе стороны от нее. В этом случае поток напряженности поля, проходящий через боковые поверхности,

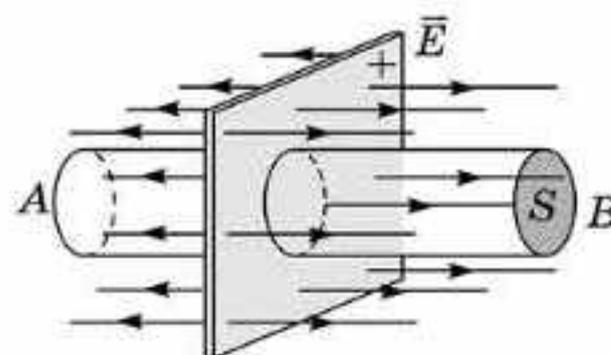


Рис. 52.4

равен нулю. Полный же поток, идущий через замкнутую поверхность, будет равен сумме потоков, проходящих через основания цилиндра:

$$N = 2ES.$$

Согласно теореме Гаусса, этот же поток равен $N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$. С учетом этого получим, что *напряженность поля заряженной плоскости* вычисляют по формуле:

$$E = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 S}. \quad (52.6)$$

Для удобства решения задач в электростатике вводят особую физическую величину — *поверхностная плотность заряда*, которая определяется зарядом, приходящимся на единицу поверхности тела:

$$\sigma = \frac{q}{S}. \quad (52.7)$$

С учетом (52.7) формула (52.6) переписется так:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (52.8)$$



Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *потоком напряженности электрического поля*?
2. Поток вектора напряженности поля может быть положительным, а может — отрицательным. Как это объяснить?
3. Сформулируйте теорему Гаусса.
4. Почему теорема Гаусса позволяет рассчитать напряженность поля, созданного телом произвольной формы?



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 53. Работа сил электрического поля



Ключевые понятия: потенциал, разность потенциалов, эквипотенциальные линии, эквипотенциальная поверхность, работа сил электрического поля.

На этом уроке вы: познакомитесь с такими энергетическими характеристиками электрического поля, как потенциал, разность потенциалов, научитесь рассчитывать работу сил электрического поля.

Выясним, как можно найти работу электрических сил при перемещении заряда q в однородном электрическом поле ($\vec{E} = \text{const}$). Пусть заряд q находится в точке B однородного электрического поля (рис. 53.1). Из курса механики известно, что работа равна произведению силы на перемещение и на косинус угла между ними. Поэтому работа электрических сил при перемещении заряда q в точку C по прямой BnC выразится следующим образом: $A_{BnC} = F \cdot BC \cdot \cos\alpha = qE \cdot BC \cdot \cos\alpha$.

Так как $BC \cdot \cos\alpha = BD$, то получим, что $A_{BnC} = qE \cdot BD$, или $A_{BnC} = qE \cdot L$.

Работа сил поля при перемещении заряда q в точку C по пути BDC равна сумме работ на отрезках BD и DC , т. е.

$$A_{BDC} = A_{BD} + A_{DC} = qE \cdot BD + qE \cdot DC \cos 90^\circ.$$

Поскольку $\cos 90^\circ = 0$, работа сил поля на участке DC также равна нулю. Поэтому

$$A_{BDC} = qE \cdot BD = qEL.$$

Следовательно, когда заряд перемещается по линии напряженности, а затем перпендикулярно к ней, то силы поля совершают работу только при перемещении заряда вдоль линии напряженности поля.

Выясним теперь, чему будет равна работа сил поля на криволинейном участке BmC . Разобьем этот участок на столь малые отрезки, что каждый из них можно принять за прямую линию (рис. 53.1). По до-

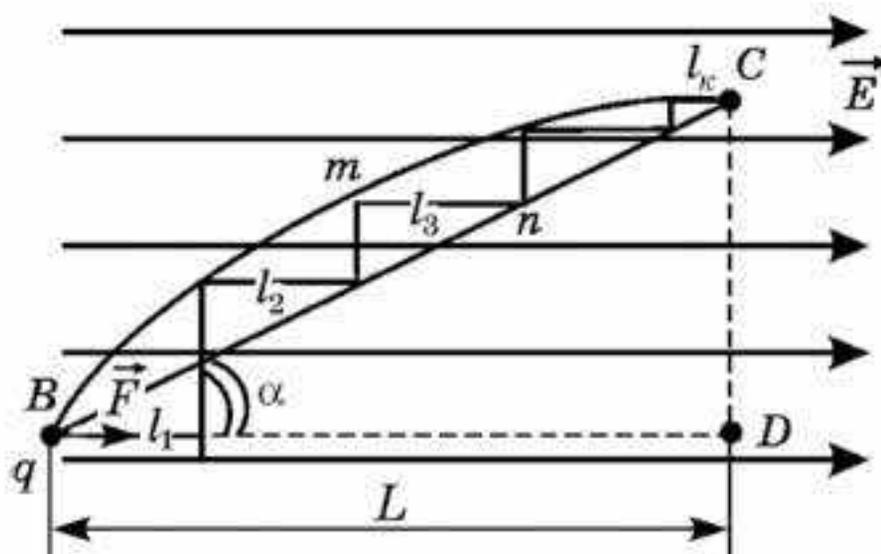


Рис. 53.1

казанному выше, работа на каждом таком участке будет равна работе на соответствующем отрезке линии напряженности l_i . Тогда вся работа на пути BmC будет равна сумме работ на отрезках l_1, l_2, l_3 и т. д. Таким образом,

$$A_{BmC} = qE(l_1 + l_2 + \dots + l_n).$$

Поскольку сумма в скобках равна длине BD , имеем

$$A_{BmC} = qE \cdot BD = qE \cdot L. \quad (53.1)$$

Итак, в однородном электрическом поле работа электрических сил не зависит от формы траектории. Этот вывод справедлив и для неоднородного поля. Если распределение в пространстве электрических зарядов, создающих электрическое поле, не изменяется со временем, то силы, порождаемые таким полем, называются **консервативными**.

Поскольку работа сил поля на участках BnC и BmC одинакова (рис. 53.1), то на замкнутом пути работа сил поля равна нулю. Действительно, если на участке BmC работа сил поля положительна, то на участке CnB она отрицательна. Итак, *работа сил электрического поля по замкнутому контуру всегда равна нулю*.

При действии только консервативной силы работа является единственной мерой изменения энергии. *Поле консервативной силы (т. е. поле, в котором работа не зависит от формы траектории) называется потенциальным*. Примерами потенциальных полей являются поле тяготения и электрическое поле.

Потенциальная энергия заряда. Поскольку силы электрического поля консервативные, то работа сил этого поля при перемещении заряда из точки B в точку C (рис. 53.1) может служить мерой изменения потенциальной энергии заряда в электрическом поле. Если обозначить потенциальную энергию заряда в точке B через W_B , а в точке C — через W_C , то

$$A_{BC} = W_B - W_C. \quad (53.2)$$

В более общем случае, когда заряд перемещается в электрическом поле из точки 1, где его потенциальная энергия была W_1 , в точку 2, где его энергия оказывается равной W_2 , работа сил поля равняется:

$$A_{12} = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1) = -\Delta W_{21}, \quad (53.3)$$

где $\Delta W_{21} = W_2 - W_1$ представляет собой *приращение потенциальной энергии заряда при его перемещении из точки 1 в точку 2*.

Из формулы (53.2) видно, что с помощью измерения работы можно узнать лишь изменение потенциальной энергии заряда q между точ-

ками поля B и C , но нет способов, позволяющих однозначно оценить его потенциальную энергию в какой-либо точке поля. Чтобы устранить эту неопределенность, можно условно принять за нуль потенциальную энергию в любой произвольно выбранной точке поля. Тогда во всех других точках потенциальная энергия будет определена уже однозначно. *Условились потенциальную энергию заряда, находящегося в точке, бесконечно удаленной от заряженного тела, создающего поле, считать равной нулю:*

$$W_{\infty} = 0.$$

Тогда для случая перемещения заряда q из точки B в бесконечность получим:

$$A_{B\infty} = W_B - W_{\infty} = W_B.$$

Следовательно, при таком условии *потенциальная энергия заряда, находящегося в какой-либо точке поля, будет численно равна работе, совершаемой силами при перемещении данного заряда из этой точки в бесконечность.*



Вопросы для самоконтроля

1. По какой формуле вычисляют работу, совершаемую силами электрического поля при перемещении заряда, в случае, когда поле однородное?
2. Какое поле называется *потенциальным*?
3. Докажите, что электрическое поле является потенциальным полем.
4. Чему равна работа сил электростатического поля при перемещении заряда по замкнутому контуру?
5. Как рассчитать потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле?
6. Как связаны потенциальная энергия заряда в электрическом поле с работой электрических сил по перемещению заряда?

Творческая мастерская

Объясните

Как надо перемещать точечный заряд в поле другого неподвижного заряда, чтобы потенциальная энергия взаимодействия зарядов: а) не менялась; б) уменьшилась; в) увеличилась?

Анализируйте

1. В однородном электростатическом поле положительный заряд q перемещают из точки M в точку N по разным траекториям (рис. 53.2). В каком соотношении находятся работы поля по перемещению этого заряда по указанным траекториям?

2. Электростатическое поле создано зарядом $+Q$ (рис. 53.3). Отрицательный заряд q перемещают из точки M по разным траекториям. В каком соотношении находятся модули работ поля по перемещению этого заряда по указанным траекториям?

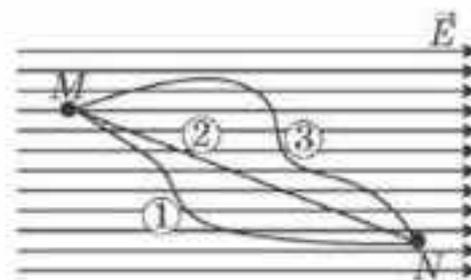


Рис. 53.2

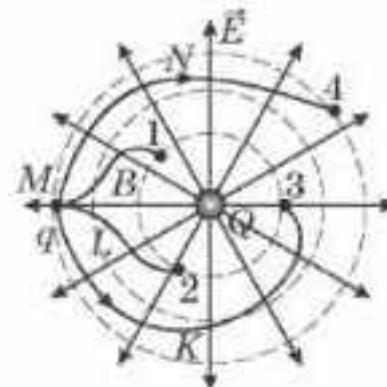


Рис. 53.3

Решайте

1. Напряженность однородного электрического поля между двумя параллельными пластинами 10 кВ/м , расстояние между ними 5 см . Определите работу по перемещению заряда 5 мкКл с одной пластины на другую.

(Ответ: $2,5 \text{ мДж}$)

2. Расстояние между зарядами $q_1 = 10 \text{ нКл}$ и $q_2 = -1 \text{ нКл}$ равно $1,1 \text{ м}$. Найдите напряженность поля на прямой, соединяющей заряды, в которой потенциал равен нулю.

(Ответ: 990 В/м)

3. Точка A находится на расстоянии 2 м , а точка B на расстоянии 1 м от точечного заряда 100 нКл . Какова разность потенциалов между точками A и B ?

(Ответ: 450 В/м)

4. Напряженность поля точечного заряда 10 мкКл в точке A равна $2,5 \text{ кВ/м}$, а в точке B — $3,6 \text{ кВ/м}$. Определите работу, необходимую для перемещения заряда 200 нКл из точки A в точку B .

(Ответ: $0,6 \text{ мДж}$)

5. Электрон вылетает из точки поля, потенциал которой 600 В , со скоростью 12 Мм/с по направлению силовой линии. Определите потенциал точки, в которой скорость электрона станет равной нулю.

(Ответ: $190,5 \text{ В}$)

Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 54. Потенциал электрического поля



Ключевые понятия: потенциал, эквипотенциальные поверхности.

На этом уроке вы: научитесь рассчитывать потенциал электрического поля; применять формулу, связывающую силовую и энергетическую характеристики поля.

Мы установили, что потенциальная энергия электрического заряда зависит от его положения в электрическом поле. Поэтому целесообразно ввести энергетическую характеристику точек электрического поля.

Поскольку сила, действующая на заряд q в электрическом поле, прямо пропорциональна заряду q , то работа сил поля при перемещении заряда также прямо пропорциональна заряду q . Следовательно, и потенциальная энергия в произвольной точке B электрического поля прямо пропорциональна этому заряду:

$$W_B = \Phi_B q. \quad (54.1)$$

Коэффициент пропорциональности Φ_B для каждой определенной точки поля остается постоянным и может служить энергетической характеристикой поля в этой точке. *Энергетическая характеристика Φ электрического поля в данной точке называется потенциалом поля в этой точке. Потенциал — это физическая величина, показывающая, какой потенциальной энергией обладает единичный пробный положительный заряд, находящийся в данной точке поля:*

$$\Phi_B = \frac{W_B}{q}. \quad (54.2)$$

Из предыдущего определения работы следует, что *потенциал точки электрического поля численно равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из этой точки в бесконечность.*

Предлагаем вам порассуждать о том, какие есть сходства и различия между электрическим полем и гравитационным полем (полем силы тяжести).

Если расстояние от заряда Q , создающего поле, до точки 1, в которой вычисляется потенциал, обозначить через r_1 , то можно показать, что потенциал в этой точке:

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_1}. \quad (54.3)$$

Отметим, что по этой же формуле вычисляется потенциал поля, созданного зарядом q , который равномерно распределен по поверхности шара для всех точек, находящихся вне шара. В этом случае r_1 обозначает

расстояние от центра шара до точки 1. Знак потенциала определяется знаком заряда, создающего поля, поэтому потенциал поля положительного заряда при удалении от него уменьшается, а потенциал поля отрицательного заряда — увеличивается. Поскольку потенциал является величиной скалярной, то, *когда поле создано многими зарядами, потенциал в любой точке поля равен алгебраической сумме потенциалов, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности.*

Разность потенциалов. Работу сил поля можно выразить с помощью разности потенциалов. При перемещении заряда $q_{\text{пр}}$ между точками 1 и 2 она определяется формулой:

$$A_{12} = -\Delta W_{21} = -(W_2 - W_1).$$

Заменив W_p его значением из формулы (54.1), получим:

$$A_{12} = -(\phi_2 q_{\text{пр}} - \phi_1 q_{\text{пр}}) = -q_{\text{пр}}(\phi_2 - \phi_1) = -q_{\text{пр}} \Delta \phi$$

Используя вместо изменения потенциала $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$ разность потенциалов в начальной и конечной точках траектории $\phi_1 - \phi_2$, получим:

$$A_{12} = q_{\text{пр}}(\phi_1 - \phi_2). \quad (54.4)$$

Разность потенциалов $(\phi_1 - \phi_2)$ есть ни что иное, как напряжение между точками 1 и 2, поэтому обозначается U_{12} . Таким образом,

$$A_{12} = q_{\text{пр}} U_{12}. \quad (54.5)$$

Опустив индекс, получим:

$$A = qU. \quad (54.6)$$

Следовательно, *работа сил поля при перемещении некоторого заряда q между двумя точками поля прямо пропорциональна напряжению между этими точками.*

Единица напряжения U в СИ:

$$[U] = \left[\frac{A}{q} \right] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В.}$$

В СИ за единицу напряжения принимается **вольт (В)**. **1 Вольт** — такое напряжение (разность потенциалов) между двумя точками поля, при котором, перемещая заряд 1 Кл из одной точки в другую, поле совершает работу 1 Дж.

Эквипотенциальные поверхности. Из формулы (54.3) видно, что во всех точках поля, находящихся на расстоянии r_1 точечного заряда Q , потенциал ϕ_1 будет одинаковый. Все эти точки находятся на поверхности сферы, описанной радиусом r_1 из точки, в которой находится точечный заряд q .

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется эквипотенциальной (от лат. экви — “равный”). Для эквипотенциальной поверхности справедливо соотношение:

$$\phi = \text{const.}$$

Линии напряженности электрического поля всегда нормальны к эквипотенциальным поверхностям. Это означает, что работа сил поля при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Поскольку работа сил поля при перемещении заряда q определяется только разностью потенциалов между началом и концом пути, то при перемещении заряда q с одной эквипотенциальной поверхности на другую (потенциалы которых ϕ_1 и ϕ_2) эта работа не зависит от формы пути и равна $A = q(\phi_1 - \phi_2)$.

Надо помнить, что под действием сил поля положительные заряды всегда перемещаются от большего потенциала к меньшему, а отрицательные — наоборот.

Подумайте над тем, как можно изменить потенциал проводника, не касаясь его и не изменяя его заряда.

Связь между напряженностью поля и напряжением. Пусть между пластинками в однородном поле имеется напряжение:

$$U = \phi_1 - \phi_2.$$

Тогда при перемещении пробного заряда $q_{\text{пр}}$ от одной пластины до другой поле совершит работу:

$$A = q_{\text{пр}} U.$$

Эту же работу можно выразить как произведение электрической силы F на путь d :

$$A = Fd = q_{\text{пр}} Ed.$$

Приравняв правые части последних двух равенств, получим:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{d}. \quad (54.7)$$

Следовательно, *напряженность однородного поля численно равна разности потенциалов на единице длины линии напряженности.*

В СИ единица напряженности имеет наименование *вольт на метр*:

$$[E] = \left[\frac{U}{d} \right] = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Напряженность электрического поля зависит от величины заряда и конфигурации заряженного тела. Для того чтобы учесть распределение электрического заряда по телу, вводят понятие плотности заряда.

Плотность заряда — величина, определяемая электрическим зарядом, приходящимся на единицу длины, площади или объема. Именно

так определяются линейная, поверхностная и объемная плотности заряда. В отличие от плотности вещества, плотность заряда может принимать не только положительные, но и отрицательные значения, поскольку существуют заряды обоих знаков.

Рассчитывают плотность заряда по формулам:

1. Линейная плотность заряда: $\tau = \frac{q}{l}$; $[\tau] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$.

2. Поверхностная плотность заряда: $\sigma = \frac{q}{S}$; $[\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

3. Объемная плотность заряда $\rho = \frac{q}{V}$; $[\rho] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$.

Теорема Гаусса позволяет рассчитать напряженность электростатического поля, создаваемого заряженными телами произвольной формы.

1. Напряженность поля равномерно заряженной плоскости:

$$E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 2S} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

2. Напряженность поля равномерно заряженной нити:

$$E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi r l} = \frac{\tau}{\epsilon\epsilon_0 2\pi r}.$$

3. Напряженность поля плоского конденсатора: $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$.



Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл потенциала?
2. По какой формуле находится потенциал поля точечного заряда?
3. Каков физический смысл *разности потенциалов*?
4. Что вы понимаете под *напряжением*?
5. Какие поверхности называются *эквипотенциальными*?
6. Нарисуйте картину силовых линий и эквипотенциальных поверхностей для: а) однородного поля; б) поля точечного заряда; в) поля заряженного цилиндра.

Примеры решения задач

1. Три маленьких заряженных шарика с зарядом q каждый, удерживаются в вакууме вдоль одной прямой на расстоянии a друг от друга двумя нитями. Какую максимальную кинетическую энергию приобретет крайний шарик, если обе нити одновременно пережечь?

Решение. По закону сохранения потенциальная энергия системы заряженных шариков переходит в их кинетическую энергию:

$$W_{\text{п}} = 2W_{\text{к}}, \text{ отсюда } W_{\text{к}} = \frac{W_{\text{п}}}{2}. \text{ Так как } W_{\text{п}} = \frac{kq^2}{a} + \frac{kq^2}{2a} + \frac{kq^2}{a} = \frac{5kq^2}{2a} = \frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a},$$

$$\text{то } W_{\text{к}} = \frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a \cdot 2} = \frac{5q^2}{16\pi\epsilon_0 a}.$$

2. Электрон вылетает из точки с потенциалом 615 В со скоростью $12 \cdot 10^6$ м/с. Определить потенциал точки, в которой: а) электрон остановится; б) скорость электрона увеличится в 2 раза.

Дано:

$$\phi_1 = 615 \text{ В}$$

$$v_1 = 12 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 0$$

$$v_2' = 2v_1$$

$$\phi_2 = ?$$

Решение. При переходе из точки с потенциалом ϕ_1 в точку с потенциалом ϕ_2 (рис. 54.1) электрон совершает работу, равную $A = e(\phi_1 - \phi_2)$. При этом меняется его кинетическая энергия, так как меняется скорость. Следовательно,

$$A = \Delta W; \text{ а) } e(\phi_1 - \phi_2) = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2};$$

$$\phi_2 = \phi_1 - \frac{mv_1^2}{2|e|} = 205,5 \text{ (В)}.$$

Ответ: а) $\phi_2 = 205,5$ В; б) $\phi_2 = 1843,5$ В.

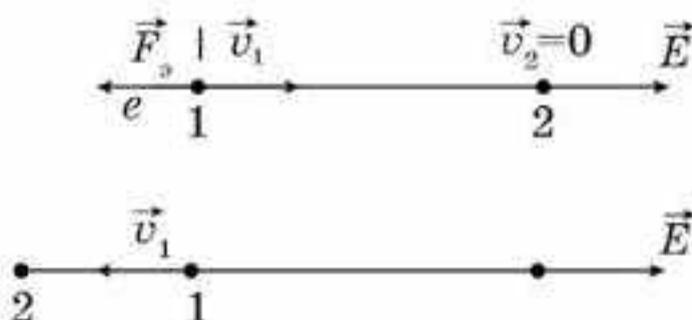


Рис. 54.1

3. Два точечных заряда — $1 \cdot 10^{-8}$ Кл и $4 \cdot 10^{-8}$ Кл расположены на расстоянии 0,2 м друг от друга в вакууме (рис. 54.2). Определить напряженность и потенциал поля в точке посередине между зарядами. На каком расстоянии от положительного заряда напряженность равна нулю?

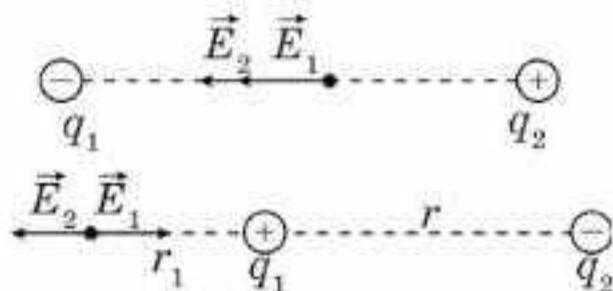


Рис. 54.2

Дано:

$$q_1 = -1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 0,2 \text{ м}$$

$$E = ? \quad \phi = ?$$

$$r' = ?$$

Решение. а) По принципу суперпозиции полей напряженность в точке равна векторной сумме напряженностей: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. По правилу сложения векторов

$$E = E_1 + E_2 = \frac{4k}{r^2} (|q_1| + q_2) = 45000 \text{ (В/м)}.$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{2k}{r} \cdot (q_1 + q_2) = \frac{1 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot (4 - 1) \cdot 10^{-8}}{0,2} = 2700 \text{ (В)}.$$

б) $E_1 = E_2; \frac{k|q_1|}{r_1^2} = \frac{kq_2}{(r + r_1)^2}; \frac{r + r_1}{r_1} = \sqrt{\frac{q_2}{q_1}}$. Следовательно, $r_1 = r = 0,2 \text{ (м)}$.

$$r' = r_1 + r = 0,4 \text{ (м)}.$$

Ответ: $E = 45000 \text{ В/м}; \phi = 2700 \text{ В}; r' = 0,4 \text{ м}$.

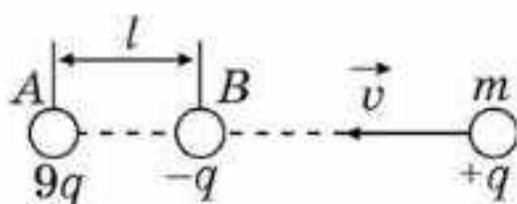


Рис. 54.3

4. В точках А и В (рис. 54.3) на расстоянии $AB = l$ закреплены заряды $+9q$ и $-q$. Вдоль прямой АВ к ним движется частица массой m , имеющая заряд $+q$. Какую наименьшую скорость должна иметь эта частица на очень большом расстоянии, чтобы достигнуть точки В?

Решение. Частица доберется до точки В, если ее кинетической энергии хватит до полета до некоторой точки С (рис. 54.4), находящейся на расстоянии x , в которой сила отталкивания меняется на силу притяжения. Найдем это расстояние. В точке С $F_1 = F_2$. Тогда $\frac{k9qq}{(x+l)^2} = \frac{kqq}{x^2}$, отсюда $x = \frac{l}{2}$.

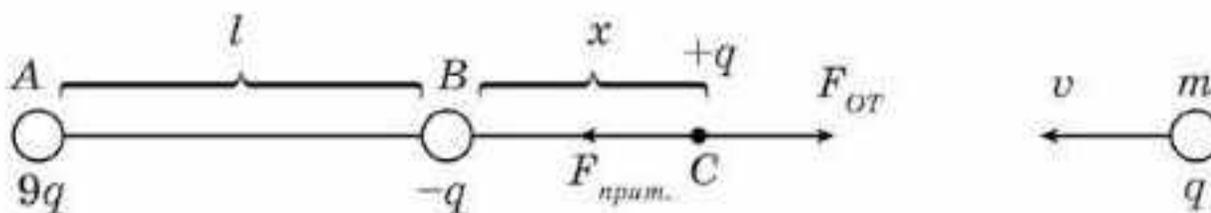


Рис. 54.4

Тогда согласно закону сохранения энергии имеем: $\frac{mv^2}{2} = \frac{k9qq}{x+l} - \frac{kqq}{x}$ или $\frac{mv^2}{2} = \frac{4kq^2}{l}$, отсюда $v = 2q \sqrt{\frac{2k}{ml}}$.

Ответ: $v = 2q \sqrt{\frac{2k}{ml}}$.



Творческая мастерская

Наблюдайте

Как меняются показания электрометра (положение лепестков), если перемещать конец проволоки, ведущей к электрометру по поверхности заряженного проводника? Объясните результаты вашего наблюдения.

Исследуйте

Как взаимно расположены силовые и эквипотенциальные линии положительно заряженного шара?

Анализируйте

Могут ли пересекаться различные эквипотенциальные поверхности?

Творите

Начертите приблизительный вид эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля возле положительного точечного заряда, помещенного над земной поверхностью.

Решайте

1. Точка A находится на расстоянии 2 м, а точка B — на расстоянии 1 м от точечного заряда 10^{-6} Кл, расположенного в точке O . Чему равна разность потенциалов точек A и B ? Как она зависит от угла между прямыми OA и OB ?

■2. Постройте графики изменения напряженности и потенциала поля вдоль линии, проходящей через два точечных заряда, находящихся на расстоянии $2d$ друг от друга. Значения зарядов следующие: а) $+q$ и $-q$; б) $+q$ и $+q$; в) $+q$ и $-3q$.

■3. По тонкому проволочному кольцу радиуса R равномерно распределен заряд q . Найдите напряженность и потенциал электрического поля в произвольной точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном: а) к плоскости кольца; б) в центре кольца.

4. Электрон, попадая в однородное электрическое поле в вакууме, движется в нем по направлению линий напряженности. Через сколько времени скорость электрона станет равной нулю, если напряженность поля 90 В/м, а начальная скорость электрона $1,8 \cdot 10^3$ км/с?

(Ответ: $1,14 \cdot 10^{-7}$ с)

5. Какова разность потенциалов двух точек поля, если при перемещении между ними заряда величиной $0,012$ Кл полем была совершена работа $0,36$ Дж?

(Ответ: 30 В)

6. Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести точечный заряд $2,0 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 28 см от поверхности проводящего шара радиусом 20 см, если потенциал шара равен 300 В? Шар находится в воздухе.

(Ответ: $2,5$ мкДж)

7. Какую работу требуется совершить для того, чтобы два заряда $3,0 \cdot 10^{-6}$ Кл, находящиеся в воздухе на расстоянии 0,6 м друг от друга, сблизить до 0,2 м?

(Ответ: 0,27 Дж)

*8. 100 маленьких одинаковых капель потенциалом 3,0 В каждая при слиянии образовали одну каплю. Каков ее потенциал?

(Ответ: 65 В)

9. Пылинка массой $1,0 \cdot 10^{-11}$ г имеет заряд, равный 20 элементарным зарядам, и находится в равновесии между двумя параллельными пластинами с разностью потенциалов 153 В. Каково расстояние между пластинами?

(Ответ: 0,005 м)

10. На расстоянии $5 \cdot 10^{-2}$ м от поверхности шара потенциал равен 600 В, на расстоянии 10^{-1} м он составляет 420 В. До какого потенциала заряжен шар?

(Ответ: 1,07 кВ)

*11. Между двумя пластинами, находящимися под напряжением 200 В, в равновесии находится отрицательно заряженная пылинка массой 400 нг. Расстояние между пластинами 8 см.

а) Определите напряженность электрического поля в конденсаторе.

б) Каков заряд у пылинки? Пылинку облучили ультрафиолетовым светом, из-за чего она потеряла электроны. Для того чтобы пылинка осталась в равновесии, пришлось поднять напряжение на конденсаторе на 600 В?

в) Определите число электронов, выбитых светом.

(Ответ: $E = 2,5$ кВ/м; $q = 1,6$ пКл; $\Delta N = 66875000$)

12. Определите напряженность и потенциал в точке, находящейся на расстоянии 20 см от поверхности заряженной сферы радиусом 10 см, если потенциал сферы равен 240 В.

(Ответ: 267 В/м; 80 В)

*13. Два одинаковых шарика, которые обладают одноименными и равными по величине зарядами, соединили пружиной длиной 4 см и жесткостью 20 Н/м. Шарик колеблется так, что расстояние между ними меняется от 3 см до 6 см. Определите величину заряда шариков.

(Ответ: 140 нКл)



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 55. Проводники в электрическом поле



Ключевые понятия: проводники, диэлектрики, электростатическая индукция, поляризация, диэлектрическая проницаемость.

На этом уроке вы: познакомитесь с электрическими свойствами проводников и диэлектриков; научитесь рассчитывать напряженности поля внутри проводников и диэлектриков.

Проводники электричества — это вещества, хорошо проводящие электрический ток. Полное электрическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы одинаковы и равны потенциалу на его поверхности. Характерная особенность проводников в том, что в них всегда имеется большое количество свободных носителей зарядов, т. е. свободных электронов или ионов. Внутри проводника эти носители зарядов движутся хаотически. Однако если в проводнике есть электрическое поле, то на хаотическое движение носителей накладывается их упорядоченное перемещение в сторону действия электрических сил. Это направленное перемещение подвижных носителей зарядов в проводнике под действием поля всегда происходит так, что поле внутри проводника ослабляется. Поскольку число подвижных носителей зарядов в проводнике велико (в 1 см^3 металла содержится порядка 10^{22} свободных электронов), их перемещение под действием поля происходит до тех пор, пока поле внутри проводника не исчезнет совсем. Выясним подробнее, как это происходит.

Пусть металлический проводник, состоящий из двух плотно прижатых друг к другу частей, помещен во внешнее электрическое поле (рис. 55.1). На свободные электроны в этом проводнике действуют силы поля \vec{F}_1 , направленные влево, т. е. противоположно вектору напряженности поля. В результате смещения электронов под действием этих сил на правом конце проводника возникает избыток положительных зарядов, а на левом — избыток электронов. Поэтому между концами проводника возникает *внутреннее поле (поле смещенных зарядов)*, которое направлено влево. Внутри проводника это поле направлено навстречу внешнему полю, и на каждый оставшийся внутри проводника свободный электрон действует с силой \vec{F}_2 , направленной вправо.

Сначала сила \vec{F}_1 больше силы \vec{F}_2 , и их равнодействующая направлена влево. Поэтому электроны внутри проводника продолжают смещаться влево, а внутреннее поле постепенно усиливается. Когда на левом конце проводника окажется достаточно много свободных

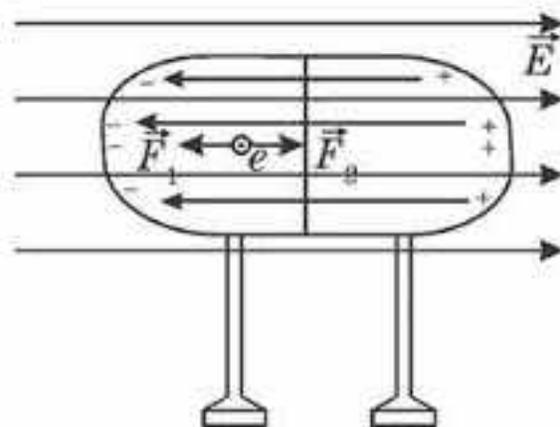


Рис. 55.1

электронов, сила \vec{F}_2 сравнивается с силой \vec{F}_1 , и их равнодействующая будет равна нулю. После этого оставшиеся внутри проводника свободные электроны будут двигаться уже хаотически. Это и означает, что напряженность поля внутри проводника равна нулю, т. е. поле внутри проводника исчезло.

Итак, когда проводник попадает в электрическое поле, то он электризуется так, что на одном его конце возникает положительный заряд, а на другом конце — такой же по величине отрицательный заряд. Такая электризация называется **электростатической индукцией**, или **электризацией влияния**.

Отметим, что в этом случае перераспределяются только собственные заряды проводника. Поэтому, если удалить такой проводник из поля, его положительные и отрицательные заряды вновь равномерно распределятся по всему объему проводника, и все его части станут электрически нейтральными.

Легко убедиться, что на противоположных концах проводника, наэлектризованного влиянием, действительно имеются равные количества зарядов противоположного знака. Разделим этот проводник на две части и затем удалим их из поля. Соединив каждую из частей проводника с отдельным электроскопом, мы убедимся, что они заряжены. Если снова соединить обе части так, чтобы они составляли один проводник, то мы обнаружим, что заряды нейтрализуются. Значит, до соединения заряды на обеих частях проводника были одинаковы по величине и противоположны по знаку.

Время, в течение которого происходит электризация проводника влиянием, настолько мало, что равновесие зарядов на проводнике возникает практически мгновенно. При этом напряженность, а значит, и разность потенциалов внутри проводника, всюду становятся равными нулю. Тогда для любых двух точек внутри проводника справедливо соотношение:

$$\phi_1 - \phi_2 = 0, \text{ т. е. } \phi_1 = \phi_2.$$

Следовательно, при равновесии зарядов на проводнике потенциал всех его точек одинаков. Это относится и к проводнику, наэлектризованному соприкосновением с заряженным телом.

Итак, независимо от того, каким способом наэлектризован проводник, при равновесии зарядов поля внутри проводника нет, а потенциал всех точек проводника одинаков (как внутри него, так и на поверхности). В то же время, поле вне наэлектризованного проводника, конечно, существует, а его линии напряженности нормальны (перпендикулярны) поверхности проводника. Следовательно, при равновесии зарядов на проводнике его поверхность является **эквипотенциальной поверхностью**.

Предлагаем вам порассуждать о том, как будет распределяться заряд, сообщенный сплошному проводнику.

Явление электрической индукции было изучено в XVIII в. русским ученым Ф. У. Элинусом (1724—1802).

Английский физик и химик Генри Кавендиш (1731—1810) первым доказал, что электрические заряды располагаются на внешней поверхности проводника. Он наэлектризовал латунный изолированный шар, а затем плотно наложил на него два полых металлических полушария, держа их за изолирующие ручки. Отняв полушария, ученый обнаружил, что внутренний шар разрядился, а полушария наэлектризовались (рис. 55.2).



Рис. 55.2

Позже другой английский физик М. Фарадей произвел подобное исследование с огромным деревянным кубом с ребром 4 м, покрытым фольгой. Во время опыта он сам находился внутри этого куба с чувствительными электроскопами, но не обнаружил присутствия электрических зарядов внутри куба, в то время как стенки куба были наэлектризованы до такой степени, что из них при приближении к внешней поверхности можно было извлечь большие искры.

Если одинаково наэлектризовать два равных по размерам уединенных металлических шара, один из которых сплошной, а другой полый, то поля вокруг шаров будут одинаковы. На опыте это впервые доказал М. Фарадей. Итак, *если полый проводник поместить в электрическое поле или наэлектризовать соприкосновением с заряженным телом, то при равновесии зарядов поле внутри полости существовать не будет.* На этом основана **электростатическая защита**. Если какой-либо прибор поместить в металлический футляр, то внешние электрические поля не будут проникать внутрь футляра, т. е. работа и показания такого прибора не будут зависеть от наличия и изменения внешних электрических полей.

Несмотря на то, что поверхность проводника является эквипотенциальной, в общем случае, распределение зарядов по поверхности не будет равномерным. Характер распределения сильно зависит от кривизны поверхности. Она растет с увеличением выпуклости и убывает с увеличением вогнутости. Для того чтобы характеризовать распределения зарядов на поверхности, вводят понятие *поверхностной плотности зарядов*. Она определяется как отношение заряда к площади поверхности, где распределен этот заряд, т. е.

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

Единица измерения поверхностной плотности зарядов $[\sigma] = \text{Кл/м}^2$.

В случае, когда заряд непрерывно распределен по объему вводится понятие *объемной плотности заряда*. Она определяется аналогично к поверхностной плотности зарядов, как отношение заряда отнесенной к единице объема, где он распределен

$$\rho = \frac{q}{V}.$$

Единица измерения объемной плотности заряда $[\rho] = \text{Кл/м}^3$.

Установлено также, что заряд распределяется равномерно только по поверхности проводника сферической формы. При произвольной форме проводника *поверхностная плотность зарядов, а, значит, и напряженность поля вблизи поверхности проводника, больше там,*

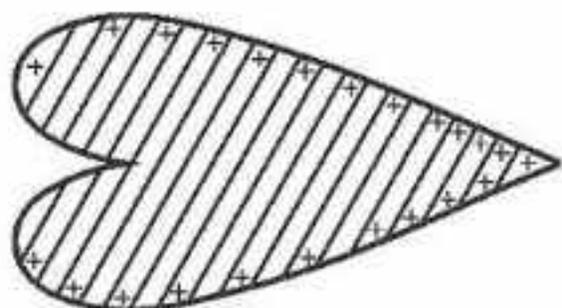


Рис. 55.3

где больше кривизна поверхности. Особенно велика плотность зарядов на выступах и на остриях проводника (рис. 55.3). Наэлектризованный проводник, имеющий заострения или снабженный острием, быстро теряет свой заряд. Поэтому проводник, заряд которого необходимо сохранять долгое время, не должен иметь заострений.



Вопросы для самоконтроля

1. Что такое *электрический проводник*?
2. Как ведут себя свободные заряженные частицы в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля?
3. Что происходит в проводнике, когда он попадает во внешнее электрическое поле?
4. Чему равна напряженность электрического поля внутри проводника в случаях, когда он: а) заряжен; б) не заряжен, но находится во внешнем электрическом поле?
5. Какое явление называется *электростатической индукцией*? Кем оно было открыто и как?
6. Каков характер распределения заряда по поверхности проводника? От чего зависит характер распределения заряда по поверхности проводника?



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 56. Диэлектрики в электрическом поле



Ключевые понятия: диэлектрик, электрический момент диполя, электронная поляризуемость молекулы, поляризованные заряды.

На этом уроке вы: рассмотрите, как ведет себя диэлектрик в электрическом поле, явление поляризации, физический смысл диэлектрической проницаемости среды.

Рассмотрим, как ведет себя диэлектрик в электрическом поле. Напоминаем, что *диэлектриком называется тело, не проводящее электрические заряды*. В диэлектрике отсутствуют свободные носители зарядов. Все электрические заряды диэлектрика входят в состав его молекул и могут смещаться лишь на очень малые расстояния — в пределах молекулы или атома. Поскольку диэлектрик уменьшает силу взаимодействия зарядов, т. е. ослабляет электрическое поле, то можно сделать вывод, что смещение зарядов внутри молекул диэлектрика действительно происходит. Выясним механизм этого явления.

Атом (рис. 56.1) состоит из ядра 1 (положительно заряженного), диаметр которого имеет размер порядка 10^{-15} м и электронного облака 2. При этом электронное облако будет иметь радиус порядка 10^{-10} м. Из сравнения размеров ядра и электронного облака видно, что ядро атома вполне можно принять за точку, которая находится в центре облака. В отсутствие внешнего электрического поля центры положительного и отрицательного зарядов совпадают (рис. 56.1, а). Если этот атом попадает в электрическое поле напряженностью \vec{E} , то облако сместится против его направления на некоторое расстояние l относительно ядра (рис. 56.1, б). Можно считать, что весь отрицательный заряд облака сосредоточен в фокусе эллипса, а весь атом, находящийся в электрическом поле, можно уподобить системе двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов $q = Ze$, которые расположены на расстоянии l (рис. 56.1). Такую систему называют *диполем*. Следовательно, когда атом попадает во внешнее электрическое поле, то он превращается в

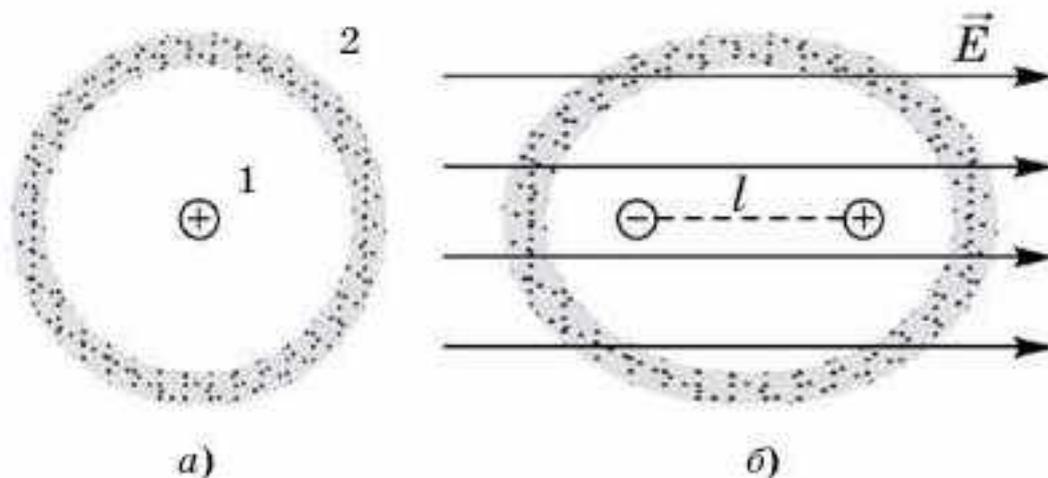


Рис. 56.1

электрический диполь, который создает свое электрическое поле, ослабляющее внешнее поле в диэлектрике. Произведение lq называется *электрическим моментом диполя* $p_{эл}$. Электрический момент $p_{эл}$ есть вектор, направленный вдоль l от отрицательного заряда к положительному (рис. 56.2), модуль которого определяется соотношением:

$$p_{эл} = lq.$$

Расчеты показали, что электрический момент молекул, обусловленный смещением электронных облаков относительно ядер, прямо пропорционален напряженности поля \vec{E} , т. е.

$$\vec{p}_{эл} = \alpha \vec{E},$$

где α называется *электронной поляризуемостью молекулы*. Тогда чем больше напряженность внешнего поля, тем больше становятся электрические моменты диполей в диэлектрике. При этом все векторы электрических моментов молекул диэлектрика оказываются направленными параллельно \vec{E} . Такой диэлектрик называется *поляризованным*.

Если в молекуле нет центра симметрии, то она обладает собственным электрическим моментом даже при отсутствии поля в диэлектрике (рис. 56.3). Поскольку атомы в такой молекуле жестко связаны, можно считать, что ее электрический момент не зависит от внешнего поля в диэлектрике. На рисунке 56.3 изображены две возможные конфигурации молекулы типа A_2B : а) *неполярная молекула* — результирующий дипольный момент равен нулю; б) *полярная молекула* — результирующий дипольный момент определяется векторной суммой дипольных моментов отдельных связей. Природными диполями являются, например, молекулы воды, в которых атомы расположены так же, как на рисунке 56.3, б.

В отсутствие внешнего поля природные диполи расположены хаотически, поэтому их поля взаимно скомпенсированы. Однако если внести

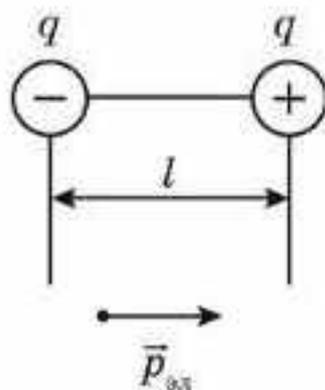


Рис. 56.2

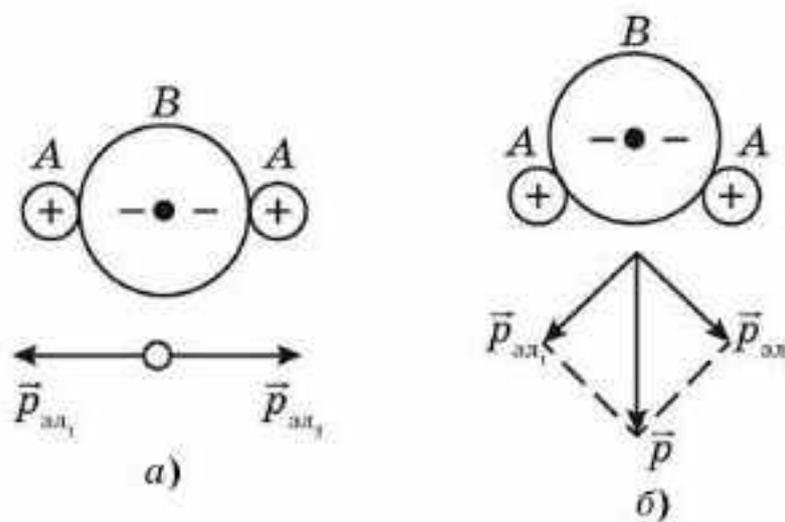


Рис. 56.3

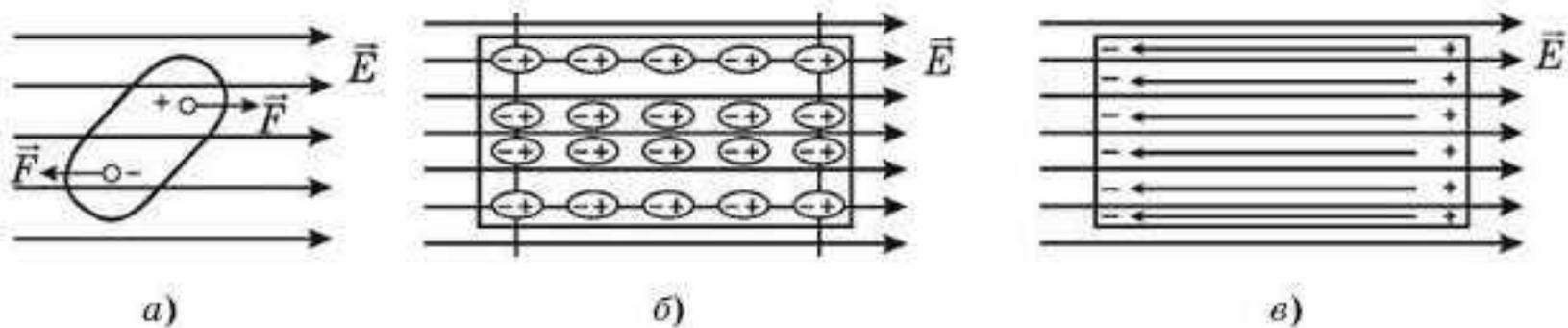


Рис. 56.4

такой диэлектрик во внешнее поле, то на каждый диполь будет действовать пара сил (рис. 56.4, а). Поэтому жесткие диполи поворачиваются, а в сильном поле даже выстраиваются цепочками вдоль линии напряженности поля (рис. 56.4, б). Диполи при этом создают собственное поле (рис. 56.4, в), ослабляющее внешнее поле в диэлектрике.

На рисунке 56.4, б видно, что разноименно заряженные концы соседних диполей должны взаимно нейтрализовать свое воздействие на другие заряды. Не скомпенсированными остаются только заряды на концах диполей, выступающих на поверхность диэлектрика. При этом с той стороны, где линии напряженности внешнего поля входят в диэлектрик, находятся отрицательные заряды диполей, а на противоположном конце — положительные заряды. Все заряды на поверхности поляризованного диэлектрика являются связанными, т. е. входят в состав молекул. Их называют **поляризованными зарядами**. Все влияние поляризованного диэлектрика на электрическое поле сводится к действию только его поляризационных зарядов. Это справедливо для всех типов поляризации.

Поле внутри диэлектрика, созданное его поляризационными зарядами, направлено навстречу внешнему полю (рис. 56.4, в), т. е. ослабляет внешнее поле, но полностью его не уничтожает. Отличие от проводника здесь проявляется еще и в том, что, разделяя поляризованный диэлектрик на части, нельзя отделить положительные заряды от отрицательных. На противоположных сторонах каждой части поляризованного диэлектрика при этом всегда остаются заряды различных знаков.

Ослабление поля в диэлектрике, обусловленное его поляризацией, объясняет влияние диэлектрика на силу взаимодействия между наэлектризованными телами. Действительно, если два заряда q_1 и q_2 поместить в диэлектрик, то он поляризуется, и вокруг зарядов q_1 и q_2 появляются поляризационные заряды, что равноценно уменьшению зарядов q_1 и q_2 (рис. 56.5), а значит, и силы взаимодействия.

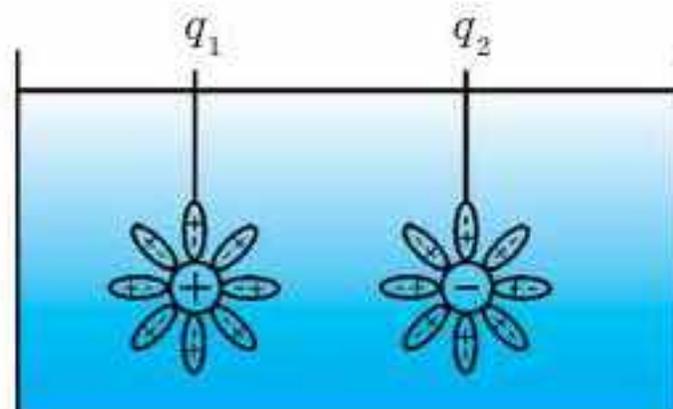


Рис. 56.5

Если напряженность поля в вакууме равна E_0 , а напряженность поля в данном диэлектрике равна E , то величина отношения $\frac{E_0}{E}$ характеризует поляризуемость диэлектрика, или относительную диэлектрическую проницаемость вещества диэлектрика ϵ . Следовательно,

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (56.1)$$

т. е. относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика есть величина, показывающая, во сколько раз напряженность поля данных зарядов в вакууме больше, чем в данном диэлектрике.

На рисунке 56.6 изображено изменение однородного поля при внесении в него диэлектрического шара. Подумайте над тем, как соотносится диэлектрическая проницаемость среды и шара.

Теперь закон Кулона для любой диэлектрической среды можно записать так:

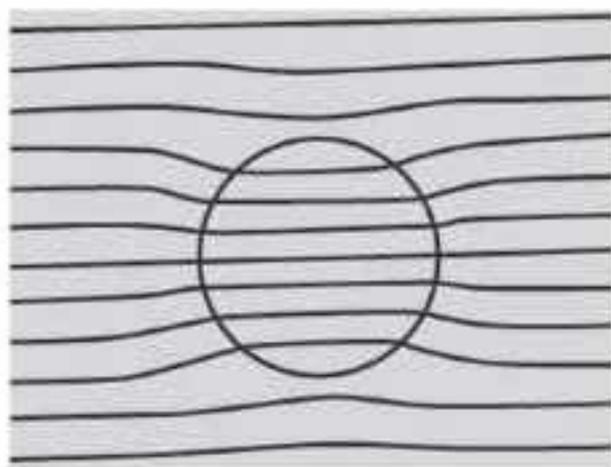


Рис. 56.6

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных электрических зарядов в любой диэлектрической среде прямо пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости среды и квадрату расстояния между зарядами.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества являются диэлектриками?
2. Что называется *диполем*?
3. Что происходит с диполем в электрическом поле?
4. Как ведет себя диэлектрик в электрическом поле?
5. Какое явление называется *поляризацией*?
6. В чем состоит отличие полярного диэлектрика от неполярного?
7. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости среды?



Творческая мастерская

Экспериментируйте

Возьмите два электрометра. Соедините их проводником на изолирующей ручке. Приблизьте к первому электрометру эбонитовую палочку, заряженную отрицательно. Стрелки обоих электрометров отклоняются. В таком положении уберите проводник, соединяющий электрометры. Убедитесь, что электрометры остались заряженными. Определите знаки их зарядов. Еще раз соедините их с проводником. Какой результат вы получили? Дайте объяснение вашему эксперименту.

Объясните

Возьмите электрометр, на стержне которого укреплена малая сфера. Поднесите к нему положительно заряженную стеклянную пластину. Зафиксируйте положение стрелки электрометра. Далее накройте сферу калориметром и так же поднесите заряженную пластинку. Еще раз зафиксируйте положение стрелки. Дайте объяснение вашим наблюдениям.

Исследуйте

Если поместить в электрическое поле проводник и диэлектрик, то внутри проводника электрическое поле отсутствует, а внутри диэлектрика поле ослабевает, но не равно нулю. Исследуйте это явление и дайте ему объяснение.

Творите

Придумайте простой опыт, позволяющий определить эквипотенциальные линии исследуемого электростатического поля.

Решайте

1. На расстоянии 3 см от заряда 4 нКл, находящегося в жидком диэлектрике, напряженность поля равна 20 кВ/м. Какова диэлектрическая проницаемость диэлектрика?
(Ответ: 2)

2. Положительно заряженный металлический шар окружен толстым сферическим слоем диэлектрика ($\epsilon = 2$). Нарисуйте картину силовых линий поля. Объясните, почему поле скачкообразно изменяется при переходе через границу диэлектрика?

3. Металлический шар диаметром 4 см погружен в достаточно большой сосуд, наполненный керосином. Найдите напряженность и потенциал электрического поля в точках, удаленных от центра шара на расстояния 1 см и 8 см. Заряд шара 100 нКл.

(Ответ: $E_1 = 0,28 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$; $\phi_1 = 1,125 \text{ В}$; $E_2 = 70 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; $\phi_2 = 5,625 \text{ кВ}$)

Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 57. Электрическая емкость



Ключевые понятия: электроемкость, конденсатор, объемная плотность энергии.

На этом уроке вы: познакомитесь с понятием электрическая емкость, а также с устройством и типами конденсаторов; научитесь рассчитывать емкости системы конденсаторов.

Возьмем проводник, изолированный от Земли, и, не изменяя его расположения относительно других проводников, будем его электризовать. Сообщив проводнику заряд q , измерим его потенциал ϕ . Сообщив проводнику заряд $q_2 = 2q$, обнаружим, что его потенциал станет равным $\phi_2 = 2\phi$. Если заряд проводника будет $q_3 = 3q$, то $\phi_3 = 3\phi$, т. е. этот опыт показывает, что заряд q такого проводника изменяется прямо пропорционально потенциалу проводника ϕ :

$$q = C\phi. \quad (57.1)$$

Здесь коэффициент пропорциональности C остается постоянным только в условиях описанного опыта. Если же провести аналогичный опыт с другим проводником или изменить внешние условия в первом опыте, то C будет иметь уже другое численное значение.

Физический смысл коэффициента C : он показывает, какой заряд необходимо сообщить проводнику, чтобы его потенциал увеличился на 1 В:

$$C = \frac{q}{\phi}. \quad (57.2)$$

Его назвали *электрической емкостью проводника*. Исследования показали, что *электроемкость проводника зависит от размеров и формы проводника и от внешних условий*.

Выведем единицу электрической емкости C в СИ:

$$[C] = [q/\phi] = 1\text{Кл}/1\text{В} = 1\text{Кл}/\text{В} = 1\text{Ф}.$$

В СИ за единицу электрической емкости принят **фарад (Ф)**. **Фарад** — электрическая емкость такого проводника, которому для повышения потенциала на 1 В необходимо сообщить заряд в 1 Кл. Фарад — очень большая единица, поэтому на практике электрическую емкость часто выражают в **микрофарадах (мкФ)** и **пикофарадах (пФ)**:

$$1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}; \quad 1\text{ пФ} = 10^{-12}\text{ Ф}.$$

Рассчитаем электроемкость шара. Из формулы (57.2) имеем

$$C_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ш}}}{\phi_1}. \quad (57.3)$$

Потенциал заряженного шара определяется формулой:

$$\phi_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ш}}}{(4\pi\epsilon_0 r_1)}. \quad (57.4)$$

Подставив значение $\phi_{\text{ш}}$ в формулу (57.3), получим:

$$C_{\text{ш}} = q_{\text{ш}} \frac{4\pi\epsilon_0 r_1}{q_{\text{ш}}}, \text{ или } C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 \epsilon r_{\text{ш}}. \quad (57.5)$$

Таким образом, *электрическая емкость уединенного проводящего шара прямо пропорциональна его радиусу.*

Воспользуемся формулой (57.5) и рассчитаем электроемкость шара радиусом 1 м:

$$C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 R_{\text{ш}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \text{ Ф} = 0,111 \text{ нФ}.$$

Аналогично рассчитаем емкость земного шара:

$$C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 R_{\text{з}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ Ф} = 711 \text{ мкФ}.$$

Видно, что емкость одиночных тел очень мала. И перед физиками встала задача: что необходимо сделать для того, чтобы увеличить емкость тела. Решение этой задачи привело ученых-физиков к мысли о необходимости использования системы двух тел.



Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *электроемкостью проводника*?
2. Что подразумевается под *электроемкостью 1 фарад*?
3. Можно ли говорить об электроемкости тела, веществом которого является диэлектрик?
4. Как зависит электроемкость шара от величины заряда, помещенного на его поверхности?
5. Как зависит электроемкость одиночного шара от его размеров?
6. Изменится ли электроемкость шара, если его переместить из воздуха в дистиллированную воду?

Творческая мастерская

Наблюдайте

1. Зарядите полый кондуктор электрометра и поднесите к нему руку. Как изменится потенциал шара? Почему?
2. Заряженные полые шары разного диаметра приведите в соприкосновение. Как распределится заряд между ними? Почему?
3. Два шара одинакового диаметра, но один — полый, а другой — сплошной, получили одинаковые заряды. Будут ли одинаковыми их потенциалы? Почему?

Объясните

1. Металлический шар погрузили в керосин и зарядили от электрофорной машины. После этого шар вынули из керосина и перенесли в воду. Изменилась ли при этом емкость шара? Если да, то как? Если нет, то почему?
2. Металлические шары разного диаметра обладают одинаковыми по модулю и знаку зарядами. Будут ли заряды перетекать с одного шара на другой, если их соединить проводником? Почему?

Решайте

1. Какого радиуса должен быть шар, чтобы его емкость была равна 1 Ф и сравните его с радиусом Солнца?

(Ответ: $9 \cdot 10^9 \text{ км}$)

2. На сколько увеличится потенциал шара, радиус которого 3 см , при сообщении ему заряда 20 нКл ? Каким будет ответ, если шар будет находиться не в воздухе, а в керосине?

(Ответ: 6 кВ ; 3 кВ)

- *3. Шар радиусом 10 см , заряженный до потенциала 10 кВ , соединили длинной проволокой с шаром радиусом 6 см , заряженным 14 кВ . На каком шаре после этого заряда будет больше, и на сколько?

(Ответ: на первом на $6,7 \text{ нКл}$)

Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 58. Устройство и типы конденсаторов



Ключевые понятия: конденсатор, соединение конденсаторов.

На этом уроке вы: научитесь применять формулы последовательного и параллельного соединений конденсаторов, исследовать зависимость электроемкости конденсатора от его параметров.

Емкость проводника может измениться под действием различных физических факторов. Имеются следующие опытные данные:

1. Емкость изолированного проводника, вблизи которого нет других проводников, равна:

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

2. Приблизив к этому заряженному проводнику в виде пластинки другой незаряженный проводник, заметим, что потенциал заряженного проводника несколько уменьшился. Удаляя второй проводник, убедимся, что потенциал первого проводника примет прежнее значение. Это покажет нам, что заряд на первом проводнике остался неизменным.

Если же заряд остался неизменным, а потенциал во время опыта уменьшился, то из формулы $C = \frac{q}{\varphi}$ следует, что емкость первого проводника увеличилась: *электроемкость проводника увеличивается с приближением к нему другого незаряженного проводника.*

3. Заземлим второй проводник и тогда заметим, что потенциал первого проводника еще более уменьшится, а его электроемкость увеличится. Удалив второй проводник, убедимся, что потенциал первого проводника примет первоначальное значение, следовательно, его заряд останется неизменным: *заземление второго проводника увеличивает электроемкость первого проводника.*

4. Поместим между проводниками твердый диэлектрик (стекло, слюда и др.). При этом потенциал первого проводника еще более уменьшится (почти до нуля), а при удалении диэлектрика и второго проводника получим начальное значение потенциала первого проводника. Значит, и в этом случае заряд остается неизменным. Уменьшение потенциала означает в этом случае, что электроемкость увеличивается: *наличие твердого диэлектрика между двумя проводниками увеличивает электрическую емкость этой системы.*

5. Станем уменьшать толщину диэлектрика: например, диэлектрик из трех стеклянных пластинок заменим диэлектриком из двух пластинок, затем — из одной пластинки. Таким образом, при неизменном типе диэлектрика уменьшение его толщины приводит к дальнейшему уменьшению потенциала, следовательно, к увеличению электроемкости: *уменьшение толщины диэлектрика увеличивает электроемкость системы проводников.*

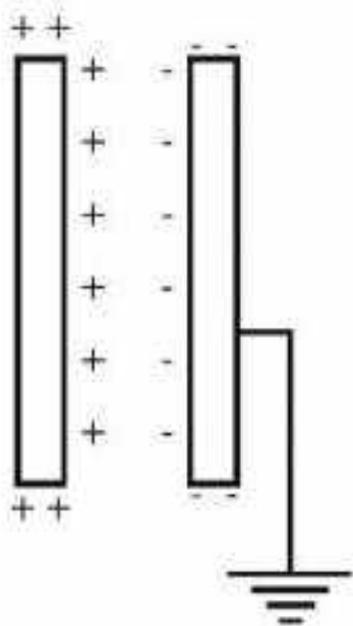


Рис. 58.1

6. Изменим вещество диэлектрика. При этом заметим, что, сохраняя все предыдущие условия, наблюдается уменьшение потенциала, а, следовательно, увеличение емкости системы, когда диэлектрическая проницаемость диэлектрика становится большей: *емкость системы проводников увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости диэлектрика.*

7. Изменяя площадь перекрытия одной пластинки другой, заметим, что с увеличением площади перекрытия уменьшается потенциал и возрастает емкость системы: *увеличение площади перекрытия проводников увеличивает электрическую емкость системы.*

Систему из двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика, называют **конденсатором** (от лат. *condenso* — “сгущать”).

Предлагаем вам порассуждать о том, как изменится потенциал изолированного заряженного проводника, если близ него помещено незаряженное тело.

Если проводники плоские и параллельно расположенные, то конденсатор называется **плоским** (рис. 58.1).

Введем обозначения: C — емкость; S — площадь одной стороны пластинки; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; d — толщина диэлектрика; n — число пластинок.

В системе СИ емкость плоского конденсатора можно вычислить по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (58.1)$$

а для конденсатора с n пластинами:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S (n - 1)}{d}. \quad (58.2)$$

Выведем формулу (58.1) для случая, когда между пластинами конденсатора (их называют *обкладками*) образуется электрическое поле напряженностью $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$, где \vec{E}_+ и \vec{E}_- — напряженности положительно и отрицательно заряженных пластин, соответственно.

Так как их модули равны и направлены в одну сторону, то модуль результирующего поля в конденсаторе равен:

$$E = 2E_+ = 2 \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 2S} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S}.$$

Поскольку напряжение и напряженность связаны друг с другом соотношением: $U = E \cdot d$, то $U = \frac{dq}{\epsilon \epsilon_0 S}$. Следовательно, $C = \frac{q}{U} = \frac{q \epsilon \epsilon_0 S}{qd} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$.

То есть емкость плоского конденсатора, состоящего из двух пластин, прямо пропорциональна площади его пластины, величине диэлектрической проницаемости и обратно пропорциональна толщине диэлектрика.

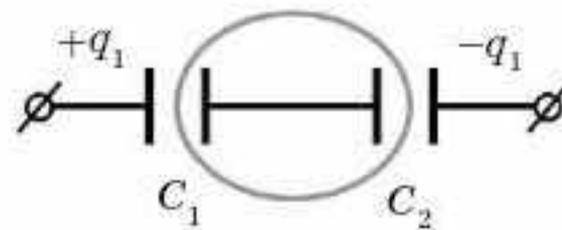


Рис. 58.2

Рассмотрим схему на рисунке 58.2. Видно, что в этом случае заряжаются левая обкладка конденсатора C_1 и правая C_2 . На других обкладках конденсаторов возникает индуцированный заряд противоположного знака. А так как внутренние пластины заряжены не были, то сумма индуцированных зарядов равна нулю, т. е. $q_2 + (-q_1) = 0$. Следовательно, $q_1 = q_2$.

Рассуждая примерно так же, можно доказать, что емкость сферического конденсатора находят по формуле:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где R_2 и R_1 — радиусы внешней и внутренней сфер.

Часто для практических целей конденсаторы соединяют в батареи. Соединения конденсаторов в батарею производят последовательно и параллельно.

Последовательное соединение конденсаторов.

При последовательном соединении конденсаторов заряды одинаковы на всех конденсаторах (и они равны заряду всей батареи). Из рис. 58.3 видно, что, если поместить заряд $+q$ на левую обкладку конденсатора C_1 , то из-за электростатической индукции на его правой обкладке появится заряд $-q$, на левой обкладке конденсатора C_2 возникнет заряд $+q$, а на его правой обкладке $-q$. Таким образом, заряд каждого из последовательно включенных конденсаторов равен q , т. е. $q_1 = q_2 = q$.

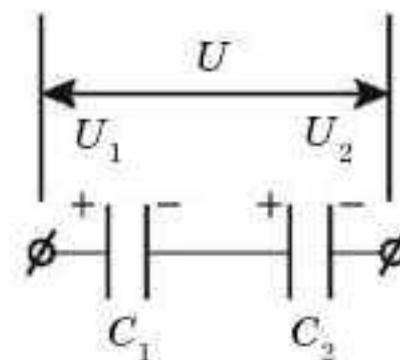


Рис. 58.3

Тогда напряжение на каждой из обкладок этих конденсаторов будет равно: $U_1 = \frac{q}{C_1}$; $U_2 = \frac{q}{C_2}$; напряжение на всей батарее конденсаторов:

$U = U_1 + U_2$, или $\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$. Следовательно, емкость батареи конденсаторов будет определяться из выражения: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

Из всего вышесказанного можно определить основные признаки последовательного соединения конденсаторов:

1. $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$;
2. $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$;
3. $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$;
4. $U_1 : U_2 : U_3 : \dots = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3} : \dots$.

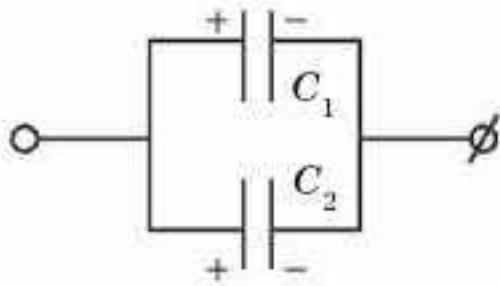


Рис. 58.4

Параллельное соединение конденсаторов. При параллельном соединении конденсаторов потенциалы левых обкладок конденсаторов C_1 и C_2 (рис. 58.3) одинаковы и имеют положительный знак. Так же одинаковы потенциалы их правых обкладок (они имеют отрицательный знак). Значит, при параллельном соединении

напряжения на отдельных конденсаторах одинаковы и равны напряжению цепи:

$$U = U_1 = U_2.$$

Заряды, накопленные конденсаторами при этом соединении, соответственно равны (они зависят от емкости конденсатора прямо):

$$q_1 = C_1 U, \quad q_2 = C_2 U.$$

Общий заряд батареи конденсаторов равен:

$$q = q_1 + q_2 = C_1 U + C_2 U = U(C_1 + C_2).$$

А так как $q = CU$, то $C = C_1 + C_2$, где C — емкость батареи конденсаторов. То есть *емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов*. Отсюда выводим признаки параллельного соединения конденсаторов:

$$\left. \begin{array}{l} 1. q = q_1 + q_2 + \dots + q_n; \\ 2. U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \\ 3. C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n; \\ 4. q_1 : q_2 : q_3 = C_1 : C_2 : C_3 : \dots \end{array} \right\} \quad (58.4)$$



Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой конденсатор?
2. Какие виды конденсаторов вы знаете?
3. Как устроены различные виды конденсаторов?
4. В каких случаях заряженные металлические проводники образуют конденсатор? В каких не образуют?
5. Дайте определение понятию *электроемкость конденсатора*.
6. Что понимается под *зарядом конденсатора*?
7. Как зависит электроемкость конденсатора: а) от заряда на его обкладках; б) от его геометрических размеров; в) от диэлектрической проницаемости среды, находящейся между его обкладками?
8. Как изменится емкость плоского конденсатора, если: а) заряд обеих его обкладок увеличить в два раза; б) заряд одной обкладки оставить прежним, а заряд второй увеличить в три раза?
9. Сформулируйте признаки последовательного и параллельного соединения конденсаторов.



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

§ 59. Энергия электрического поля



Ключевые понятия: энергия электрического поля, плотность энергии.

На этом уроке вы: научитесь рассчитывать энергию электрического поля.

Работа сил электрического поля при перемещении заряда q между двумя точками поля равна $A = qU$, если напряжение U остается постоянным. Однако при зарядке конденсаторов напряжение на его обкладках возрастает от нуля до U (рис. 59.1), и при вычислении работы поля в этом случае для напряжения нужно брать его среднее значение. Таким образом, $A = qU_{\text{ср}} = \frac{q(U + 0)}{2} = \frac{qU}{2}$.

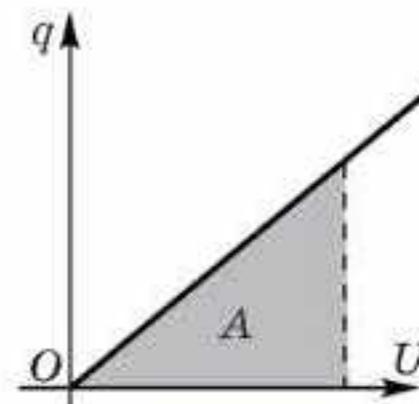


Рис. 59.1

Поскольку работа A идет на увеличение энергии $W_{\text{эл}}$ заряженного конденсатора, то $W_{\text{эл}} = A$. Следовательно, энергия заряженного конденсатора выражается формулой:

$$W_{\text{эл}} = \frac{qU}{2}. \quad (59.1)$$

Так как $q = CU$, получаем еще одну формулу для энергии конденсатора:

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2}{2}. \quad (59.2)$$

Так как $U = \frac{q}{C}$, то

$$W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}. \quad (59.3)$$

Здесь возникает вопрос: является ли энергия $W_{\text{эл}}$ энергией зарядов на обкладках конденсатора или это энергия поля, созданного этими зарядами? Согласно теории близкодействия, этой энергией обладает поле. Так как поле конденсатора сосредоточено в пространстве между его обкладками и однородно, то энергия этого поля равномерно распределена в этом пространстве.

Подумайте над тем, возможно ли увеличить энергию заряженного школьного раздвижного конденсатора, не изменяя его заряда.

Объемной плотностью энергии $\omega_{\text{эл}}$ однородного электрического поля называется величина, которая измеряется энергией поля, заключенной в единице объема: $\omega_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{эл}}}{V}$.

Заменив C в формуле (59.2) его значением из (58.1), получим:

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon SU^2}{2d}. \quad (59.4)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части формулы (59.4) на d , имеем:

$$W_{\text{эл}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} Sd.$$

Так как $Sd = V$, а $E = \frac{U}{d}$, получаем $W_{\text{эл}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2 V}{2}$, откуда

$$\omega_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{эл}}}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (59.5)$$

Плотность энергии электрического поля прямо пропорциональна квадрату напряженности этого поля.



Вопросы для самоконтроля

1. Почему заряженный конденсатор обладает энергией? Как она называется? По какой формуле можно вычислить эту энергию?
2. В чем состоит отличие конденсатора как источника электрической энергии от обычного источника тока?
3. Как изменится энергия электрического поля заряженного конденсатора, отключенного от источника тока, если: а) расстояние между его обкладками уменьшить; б) уменьшить диэлектрическую проницаемость среды, находящейся между обкладками; в) увеличить площадь обкладок конденсатора?
4. Как изменится энергия электрического поля заряженного конденсатора, подсоединенного к источнику тока, если: а) расстояние между его обкладками уменьшить; б) уменьшить диэлектрическую проницаемость среды, находящейся между обкладками; в) увеличить площадь обкладок конденсатора?
5. Что называется *объемной плотностью энергии электрического поля*? По какой формуле она рассчитывается?
6. Каковы единицы измерения объемной плотности энергии электрического поля?

Примеры решения задач

1. Пластина из слюды с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$ находится между обкладками плоского конденсатора, присоединенного к аккумулятору. Заряд конденсатора 14 мкКл. Какой заряд пройдет через аккумулятор при удалении пластины?

Дано:

$$\varepsilon_1 = 7$$

$$\varepsilon_2 = 1$$

$$q_1 = 14 \text{ мкКл} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\Delta q = ?$$

Решение. $U = \frac{q}{C}$. Так как $U = \text{const}$,

$$\text{то } \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}; C_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S}{d}; C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d},$$

$$\text{отсюда } C_1 = \varepsilon_1 C_2; \frac{q_1}{\varepsilon_1 C_2} = \frac{q_2}{C_2}; q_1 = \varepsilon_1 q_2.$$

$$\text{Тогда } q_2 = \frac{q_1}{\varepsilon_1}, \text{ а } \Delta q = q_1 - q_2 = q_1 - \frac{q_1}{\varepsilon_1} = \frac{q_1 (\varepsilon_1 - 1)}{\varepsilon_1};$$

$$\Delta q = 14 \cdot \frac{6}{7} = 12 \text{ (мкКл)}.$$

Ответ: $\Delta q = 12$ (мкКл).

2. Конденсатор емкостью $C_1 = 3$ мкФ заряжен до напряжения $U_1 = 300$ В, а конденсатор емкостью $C_2 = 2$ мкФ — до $U_2 = 200$ В. Определите напряжение между пластинами конденсаторов после соединения их: а) одноименно заряженными пластинами; б) разноименно заряженными пластинами. Какое количество теплоты выделится в результате соединения конденсаторов в случае “а)” и “б)”?

Дано:

$$C_1 = 3 \text{ мкФ} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 2 \text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_1 = 300 \text{ В}, U_2 = 200 \text{ В}$$

$$U_3 = ? \quad U_4 = ? \quad Q = ?$$

Решение. Если конденсаторы соединены параллельно, то их общая емкость $C = C_1 + C_2$. Так как соединились одноименно заряженные пластины, то искомое

напряжение $U_3 = \frac{q}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$, где q_1 и q_2 — заряды конденсаторов до соединения.

$$\text{Учитывая, что } q_1 = C_1 U_1 \text{ и } q_2 = C_2 U_2, \text{ получим } U_3 = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 260 \text{ В}.$$

Если конденсаторы соединены разноименно заряженными пластинами, то напряжение между ними $U_4 = \frac{C_1 U_1 - C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 100 \text{ В}.$

Количества выделившейся теплоты определим, пользуясь законом сохранения и превращения энергии. Энергия конденсаторов до соединения: $W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} = 175 \text{ мДж}.$ Энергия конденсаторов после

$$\text{соединения: } W_2 = \frac{C U^2}{2} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) \cdot U_3^2 = 169 \text{ мДж}.$$

Количество теплоты, выделившееся после соединения, равно:

$$\text{в случае а) } Q = (175 - 169) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 6 \text{ мДж};$$

$$\text{в случае б) } Q = (175 - 25) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 150 \text{ мДж}.$$

3. Конденсатор емкостью $C = 20$ мкФ заряжен до напряжения $U_0 = 400$ В. К нему подключается конденсатор емкостью $C_1 = 1$ мкФ, в результате чего последний заряжается. Затем, отключив этот конденсатор, заряжают таким же образом второй конденсатор с той же электроемкостью ($C_1 = 1$ мкФ), потом третий и т. д. После этого конденсаторы соединяют последовательно. Какое максимальное напряжение можно получить таким способом?

Дано:

$$C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_0 = 400 \text{ В}$$

$$C_1 = 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_{\text{max}} = ?$$

Решение. Начальный заряд конденсатора $q = CU_0$, где U_0 — начальное напряжение.

После подключения конденсатора емкостью C_1 заряд q распределится между конденсаторами C и C_1 так, что на конденсаторе C останется q_1 . Найдем q_1 .

При параллельном соединении конденсаторов разности потенциалов U_1 на пластинах C и C_1 будут одинаковыми. Поэтому $q = U_1(C + C_1)$.

После отсоединения C_1 от C на обоих конденсаторах будет разность потенциалов $U_1 = \frac{q}{C + C_1} = \frac{CU_0}{C + C_1}$. Оставшийся на конденсаторе C заряд:

$$q_1 = CU_1 = \frac{C^2 U_0}{C + C_1}. \quad (1)$$

После присоединения нового незаряженного конденсатора C_1 заряд q_1 распределится снова между C и C_1 и на C останется заряд q_2 :

$$q_2 = U_2(C + C_1).$$

Напряжение на конденсаторах C и C_1 после их разъединения

$$U_2 = \frac{q_1}{C + C_1} = \frac{C^2 U_0}{(C + C_1)^2}. \quad (2)$$

Оставшийся заряд $q_2 = CU_2 = \frac{C^3 U_0}{(C + C_1)^2}$.

Повторяя эту операцию, получим набор конденсаторов, заряженных до напряжений $U_1, U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$, где U_1 и U_2 определяются выражениями (1) и (2), а U_3, U_4, \dots, U_n можно найти, пользуясь методом математической индукции:

$$U_3 = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^3, \quad U_4 = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^4, \quad \dots, \quad U_n = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^n.$$

Общее напряжение на батарее из последовательно соединенных конденсаторов

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \frac{CU_0}{C + C_1} \left(1 + \frac{C}{C + C_1} + \frac{C^2}{(C + C_1)^2} + \dots + \frac{C^{n-1}}{(C + C_1)^{n-1}} \right).$$

Просуммировав члены получившейся бесконечно убывающей геометрической прогрессии со знаменателем $\frac{C}{C+C_1}$, найдем

$$U_{\max} = \frac{CU_0}{C+C_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{C}{C+C_1}} = \frac{CU_0}{C_1} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{10^{-6}} = 8000 \text{ В.}$$

4. В плоский конденсатор длиной 5 см влетает электрон под углом 15° к пластинам. Энергия электрона 1500 эВ, расстояние между пластинами 10 мм. При каком напряжении на конденсаторе электрон вылетит параллельно пластинам конденсатора? Каким будет ответ, если длину конденсатора увеличить до 10 см?

Дано:	СИ
$l_1 = 5 \text{ см}$	$5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$\alpha = 15^\circ$	
$W_k = 1500 \text{ эВ}$	$2,4 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$
$d = 10 \text{ мм}$	10^{-2} м
$l_2 = 10 \text{ см}$	$10 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$q_0 = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	
$U_1 - ? U_2 - ?$	

Решение. Изобразим ситуацию, описанную в задаче на рисунке 59.2. Рассмотрим первую часть задачи:

$$l_1 = v_0 t \cos \alpha,$$

где t_1 — время, в течение которого “исчезнет” проекция начальной скорости электрона на ось Oy , т. е.

$$0 = v_0 \sin \alpha - at_1 \text{ и } t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{a}; \text{ тогда } l_1 = \frac{v_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{a}.$$

Величину ускорения найдем, используя второй закон Ньютона:

$$a = \frac{F_s}{m} = \frac{E \cdot q_0}{m} = \frac{U_1 q_0}{dm}; \text{ тогда } l_1 = \frac{mv_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d}{U_1 q_0} \text{ так как } \frac{mv_0^2}{2} = q_0 U_0,$$

$$\text{то } l_1 = \frac{2q_0 U_0 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d}{U_1 q_0} = \frac{W_k d \cdot \sin 2\alpha}{U_1 q_0} \text{ отсюда } U_1 = \frac{W_k d \cdot \sin 2\alpha}{l_1 q_0}; \text{ тогда}$$

$$U_1 = \frac{2,4 \cdot 10^{-16} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 150 \text{ В.}$$

Если длину конденсатора увеличить вдвое (по условию задачи), то электрон из него не вылетит (согласно симметрии).

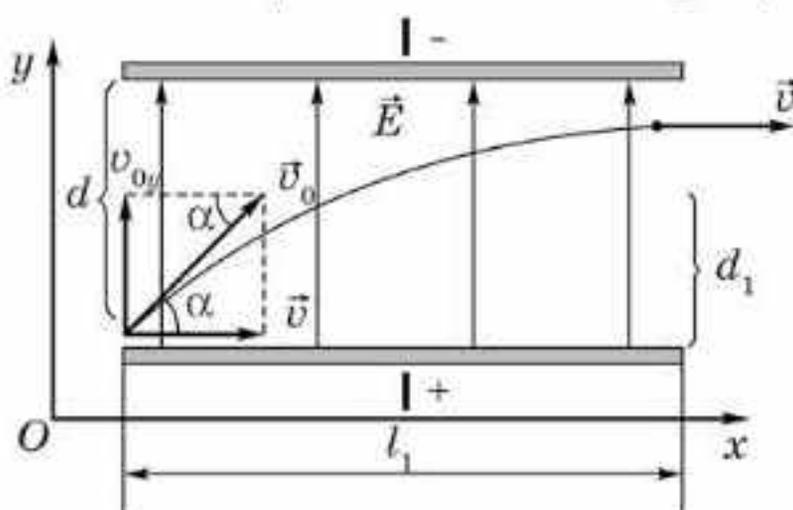


Рис. 59.2

Творческая мастерская

Экспериментируйте

1. Сконструируйте простейший плоский конденсатор из подручных материалов: металлическая пластинка, соединительные провода, штатив с лапками. Пластины соедините с электрометром, одну со стержнем, другую с корпусом электрометра. Эбонитовой палочкой зарядите одну из пластин и наблюдайте за показаниями электрометра, когда раздвигаете пластины.

2. Меняя взаимно перекрываемую площадь пластин сконструированного вами конденсатора, определите, как меняется его емкость. Дайте объяснение вашему эксперименту.

Объясните

В какой из точек заряженного конденсатора с непараллельными обкладками поверхностная плотность заряда больше?

Изменится ли разность потенциалов пластин плоского воздушного конденсатора, если одну из них заземлить?

Исследуйте

С помощью сконструированного вами конденсатора исследуйте диэлектрическую проницаемость различных материалов (воздух, бумага, стекло).

Анализируйте

Что произойдет с разностью потенциалов на пластинах заряженного конденсатора, если уменьшить расстояние между ними?

Творите

Придумайте способ, как измерить разность потенциалов двух проводников, например, двух изолированных заряженных металлических шаров. Укажите необходимый для этого прибор и начертите, как этот прибор следует применять.

Решайте

*1. Маленькие одинаковые капли ртути заряжены одноименно до потенциала ϕ_0 каждая. Определите потенциал большой капли, образовавшейся при слиянии n таких капель.

(Ответ: $\phi = \sqrt[3]{n^2} \cdot \phi_0$)

2. Три конденсатора емкостью 12 мкФ рассчитаны на напряжение 600 В. Какие емкости можно получить и каковы допустимые напряжения в каждом случае?

3. Заряженный конденсатор подключили параллельно к такому же незаряженному. Во сколько раз изменилась энергия поля?

■4. Потенциалы шаров емкостью 6,0 и 9,0 пФ равны $2,0 \cdot 10^2$ и $8,0 \cdot 10^2$ В, соответственно. Найдите суммарный заряд обоих шаров. Определите потенциал шаров после соприкосновения.

(Ответ: $8,4 \cdot 10^{-9}$ Кл; 560 В)

5. Площадь пластины слюдяного конденсатора 36 см^2 , толщина слоя диэлектрика $0,14 \text{ см}$. Вычислите емкость, заряд и энергию конденсатора, если разность потенциалов на его обкладках $3,0 \cdot 10^3 \text{ В}$, а диэлектрическая проницаемость слюды 6.

(Ответ: $136,5 \text{ пФ}$; 41 нКл ; $6,14 \text{ мкДж}$)

6. Конденсатор емкостью 60 мкФ и напряжением на обкладках $4,0 \cdot 10^2 \text{ В}$ соединили параллельно с незаряженным конденсатором емкостью 100 мкФ . Какое напряжение установилось на обкладках обоих конденсаторов? Как распределится заряд?

(Ответ: 150 В ; 150 В ; в первом: $9 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$; во втором: $15 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$)

7. Проводящий шарик диаметром $2,0 \text{ см}$ с потенциалом $90\,000 \text{ В}$ заземлили проводником. Какое количество энергии выделится в проводнике?

(Ответ: $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$)

8. Два конденсатора емкостями $4,0$ и $1,0 \text{ мкФ}$ соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения 220 В . Определите общую емкость. Как распределится напряжение между конденсаторами?

(Ответ: $0,8 \text{ мкФ}$; 44 В ; 176 В)

*9. Во сколько раз изменятся энергия и заряд бумажного конденсатора ($\epsilon = 2$), если расстояние между пластинами увеличить вдвое, а бумагу заменить слюдой ($\epsilon = 8$)? Рассмотреть два случая: а) конденсатор подключен к источнику тока; б) конденсатор отключен от источника тока.

(Ответ: а) уменьшились в 4 раза; б) увеличились в 4 раза)

*10. Два конденсатора, емкость первого из которых в 4 раза больше емкости второго, соединили последовательно и подключили к источнику тока с напряжением 120 В . Емкость второго конденсатора $C = 5 \text{ мкФ}$: а) определите напряжение на каждом конденсаторе; б) на каком конденсаторе энергия будет больше и во сколько раз? в) каково отношение зарядов, накопленных конденсаторами.

Затем заряженные конденсаторы отключили от источника тока и друг от друга и соединили параллельно: г) каким будет после этого напряжение на конденсаторах? д) какое количество теплоты выделится после того, как конденсаторы соединили параллельно?

(Ответ: а) $U_1 = 24 \text{ В}$; $U_2 = 96 \text{ В}$; б) $W_1 = 5,76 \text{ мДж}$, $W_2 = 23 \text{ мДж}$;
в) $q_1/q_2 = 1$; г) $U_1 = U_2 = 38,4 \text{ В}$; д) $Q = 10,33 \text{ мДж}$)



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен материал?
2. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?
3. Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. С какими из заданий "Творческой мастерской" вы испытали наибольшие затруднения?
5. Каким было настроение в ходе изучения материала параграфа? Как оно менялось?

Электростатика — раздел физики, изучающий взаимодействие неподвижных зарядов.

Электризация — явление, при котором нейтральное тело становится заряженным.

В замкнутой системе справедлив *закон сохранения заряда*: заряд ниоткуда не берется и никуда не исчезает — он только переходит от одного тела к другому, а алгебраическая сумма зарядов в системе остается величиной неизменной: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = q = \text{const}$.

Электрический заряд дискретен: $q = ne$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд.

Неподвижные точечные электрические заряды взаимодействуют друг с другом, и сила их взаимодействия определяется законом Кулона:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Взаимодействие зарядов осуществляется посредством электрического поля — особого вида материи, непрерывного в пространстве и не фиксируемого нашими органами чувств.

Для характеристики поля были введены две характеристики: *силовая* — напряженность $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ и *энергетическая* — потенциал $\varphi = \frac{W_p}{q}$.

Зная напряженность электрического поля, можно рассчитать силу, с которой поле действует на заряд: $\vec{F} = \vec{E}q$. Сама же напряженность зависит от формы заряженного тела, создающего поле. Так, напряженность поля точечного заряда и шара находится по формуле $E = k \frac{q}{\epsilon r^2}$; напряженность поля плоскости — по формуле $E = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 S}$; напряженность поля плоского конденсатора — $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}$.

Напряженность поля и электрический заряд внутри проводника равны нулю, а в диэлектрике электрическое поле ослабевает.

Электрическое поле — потенциальное поле, его работа не зависит от формы траектории и равна убыли потенциальной энергии заряда в поле $A = -\Delta W_p$.

Работу по перемещению заряда в однородном электрическом поле можно рассчитать по формулам $A = Eq\Delta d$, или $A = qU$, где $U = \phi_1 - \phi_2$ — разность потенциалов. Напряженность и напряжение связаны формулой $U = E\Delta d$, где U — разность потенциалов (напряжение) между точками, находящимися на расстоянии Δd друг от друга.

Потенциал точечного заряда находят по формуле $\phi = k \frac{q}{\epsilon r}$. Потенциальная энергия системы двух точечных зарядов равна

$$W_p = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}.$$

Работа по перемещению заряда q_0 в поле точечного заряда q равна

$$A = - \left(k \frac{q_0 q}{\epsilon r_2} - k \frac{q_0 q}{\epsilon r_1} \right).$$

Каждый проводник способен накапливать электрический заряд. Эта его способность характеризуется *емкостью*. Емкость проводника определяется по формуле:

$$C = \frac{q}{\phi}.$$

Емкость конденсатора определяют по формуле: $C = \frac{q}{U}$. Емкость выражается в фарадах: $1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

Емкость проводников и конденсаторов не зависит от заряда на них, а определяется их геометрическими размерами. Так, емкость шара равна $C = \frac{\epsilon R}{k}$, где R — радиус шара; емкость плоского конденсатора — $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$, где S — площадь обкладок конденсатора; d — расстояние между ними.

Заряженный конденсатор обладает электрической энергией:

$$W_\epsilon = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

Конденсаторы соединяют между собой последовательно и параллельно.

Признаки последовательного соединения	Признаки параллельного соединения
1) $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q$;	1) $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$;
2) $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$;	2) $U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$;
3) $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.	3) $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.

Глава 11. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 60. Условия существования постоянного тока. Закон Ома для участка цепи



Ключевые понятия: электрический ток, сила тока, плотность тока, ЭДС, закон Ома для участка цепи, сопротивление проводника, удельное сопротивление.

На этом уроке вы узнаете, что такое *электрический ток*, условия существования тока; познакомитесь с понятиями *сила тока*, *ЭДС*, *сопротивление*; научитесь применять закон Ома для участка цепи.

Мы с вами достаточно подробно разобрали, как ведет себя заряженная частица в электрическом поле. Под действием сил электрического поля заряженная частица будет перемещаться в определенном направлении.

Рассмотрим поведение большого числа свободных заряженных частиц в однородном электрическом поле. Под действием сил этого поля они начнут перемещаться в одном направлении, сохраняя тепловое движение, которое носит хаотический характер и зависит от температуры. Такое *направленное*, или еще говорят, *упорядоченное движение электрически заряженных частиц*, называется *электрическим током*.

Электрический ток, возникающий в проводящих средах в результате упорядоченного движения свободных зарядов под действием электрического поля, созданного в этих средах, называется током проводимости. Примерами тока проводимости являются: ток в металлах, связанный упорядоченным движением свободных электронов; ток в полупроводниках, возникающий из-за движения свободных и “связанных” электронов; ток в электролитах, представляющий собой упорядоченное перемещение ионов противоположных знаков.

Условия, необходимые для появления и существования электрического тока:

1) Наличие в данной среде *свободных носителей тока* — *заряженных частиц, которые могли бы в ней упорядоченно перемещаться.* Такими частицами в металлах являются электроны проводимости; в полупроводниках — электроны проводимости и дырки; в жидких проводниках (электролитах) — положительные и отрицательные ионы; в газах — положительные и отрицательные ионы и электроны.

2) Существование в данной среде внешнего электрического поля, энергия которого должна расходоваться на упорядоченное перемещение электрических зарядов. Для поддержания электрического тока энергия электрического поля должна непрерывно пополняться, т. е.

необходим *источник электрической энергии* — устройство, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля.

Для того чтобы выполнить эти два условия, собирают электрическую цепь. Основными компонентами электрической цепи являются: *источник тока* — устройство, преобразующее любой вид энергии в электрическую; *соединительные провода*; *элементы, замыкающие и размыкающие цепь*; *потребители тока* — устройства, преобразующие электрическую энергию в тепловую, механическую и т. д. Для каждого из этих компонентов существуют условные обозначения в электрической схеме. Мы их изучили в 8 классе.

Ток, проходя по элементам цепи, оказывает тепловое, химическое и магнитное действие, причем магнитное действие оказывается им всегда. Для того чтобы оценить действие тока, количественно вводят особую физическую величину — *силу тока I* . *Силой тока I называется физическая величина, которая показывает, какой заряд Δq проходит через поперечное сечение проводника за единицу времени, т. е.*

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (60.1)$$

Измеряется сила тока в **амперах** $[I] = \text{А}$.

Электрический ток называется постоянным, если сила тока не изменяется ни по величине, ни по направлению.

Для полной характеристики электрического тока вводят еще одну физическую величину: *плотность тока j* , которая показывает, какой ток проходит в единичном сечении проводника:

$$j = \frac{I}{S}. \quad (60.2)$$

Единица измерения плотности тока: $[j] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Направлением электрического тока считается направление упорядоченного движения положительных электрических зарядов. Однако в действительности в металлических проводниках ток осуществляется упорядоченным движением электронов, которые движутся в направлении, противоположном направлению тока.

Если электрический ток постоянный, то ни в одной части проводника заряды не должны ни накапливаться, ни убывать. Цепь постоянного тока должна быть замкнутой, и должно выполняться условие: $q_{S_1} = q_{S_2}$, где q_{S_1} — суммарный электрический заряд, поступающий за единицу времени сквозь поверхность S_1 в объем проводника, заключенного между поперечными сечениями S_1 и S_2 ; q_{S_2} — суммарный электрический заряд, выходящий из этого объема за единицу времени сквозь поверхность S_2 .

В предыдущей главе мы с вами установили, что работу электрического поля по перемещению заряда можно вычислить по формуле $A_{\text{эл}} = q \cdot U$, где q — величина перемещенного заряда; U — напряжение (разность потенциалов). Отсюда можно дать определение электрическому напряжению: *электрическое напряжение — это физическая величина, определяемая работой электрического поля по перемещению единичного электрического заряда, т. е.*

$$U = \frac{A_{\text{эл}}}{q}. \quad (60.3)$$

В то же время работа сил электрического поля при перемещении заряда по замкнутому контуру равна нулю. Это означает, что, если в замкнутой цепи на заряды действуют одни только электрические силы, то работу с помощью тока получить нельзя. Следовательно, в электрической цепи должен быть хотя бы один такой участок, в котором на подвижные носители зарядов, кроме сил электрического поля, действовали бы еще какие-либо другие силы, способные совершить работу по перемещению этих зарядов в сторону, противоположную действию электрических сил. Такие силы называют *сторонними*.

Представим себе два заряженных проводника A и B (рис. 60.1). Допустим, что потенциал проводника A больше, чем потенциал проводника B . Если соединить их проводником ACB , то положительные заряды под действием сил электрического поля $\vec{F}_{\text{эл}}$ устремятся от A к B по проводнику ACB . Однако это движение очень скоро прекратится, так как потенциалы проводников A и B станут равными. Чтобы этого не произошло и движение носителей тока продолжалось достаточно долго, необходимо положительные заряды от проводника B каким-то образом перенести снова в точку A , например, по проводнику BDA . Но такое перемещение зарядов самопроизвольно происходить не может, так как силы электрического поля действуют на них в противоположную сторону.

Следовательно, в проводнике BDA на заряды должны действовать сторонние силы $\vec{F}_{\text{ст}}$, направленные против сил электрического поля и превышающие их по величине. Тогда на участке ACB носители тока будут двигаться под действием сил электрического поля от A к B , а на участке BDA — под действием поля сторонних сил от B к A . В этом

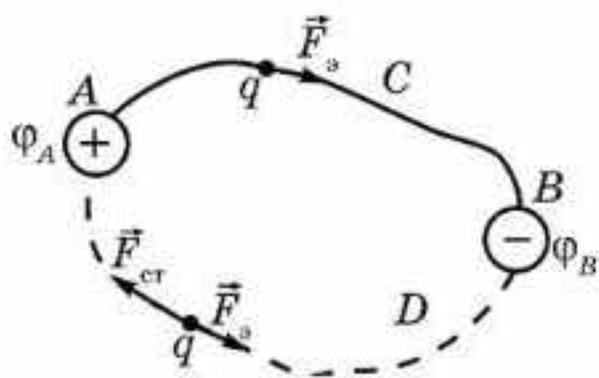


Рис. 60.1

случае в замкнутой цепи будет непрерывно циркулировать поток зарядов, т. е. будет идти электрический ток, а потенциалы проводников A и B не смогут выравняться. Сторонние силы будут совершать работу по перемещению подвижных носителей зарядов на участке BDA , преодолевая противодействие электрического поля и части веще-

ства, из которого сделан проводник BDA . За счет работы, выполненной сторонними силами против сил электрического поля, ток совершает работу на участке цепи ACB .

Таким образом, на участке BDA электрическая энергия получается за счет других видов энергии, а на участке ACB , наоборот, электрическая энергия будет превращаться в другие виды энергии, например, во внутреннюю энергию проводника. Поэтому участок цепи, в котором заряды движутся в сторону действия сторонних сил, называют *источником электрической энергии* (участок BDA).

Величину, характеризующую зависимость электрической энергии, приобретенной зарядом в источнике от внутреннего устройства последнего, называют электродвижущей силой источника (ЭДС) и обозначают E . Электродвижущая сила источника характеризуется работой сторонних сил, выполненной при перемещении единичного положительного заряда:

$$E = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (60.4)$$

Единицей ЭДС в СИ является **1 В (вольт)**: $1 [\text{В}] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right]$.

Из вышесказанного следует, что сторонние силы должны иметь природу неэлектрического происхождения. В источниках тока в качестве сторонних сил могут выступать силы, возникающие за счет энергии химической реакции (аккумуляторы, гальванические элементы), или тепловой (*термопара*), световой (*солнечные батареи*) энергии и т. д.

Рассмотрим один из типов источников тока, где используется энергия химической реакции, — *элемент Вольта*. В сосуд, в котором находится раствор серной кислоты H_2SO_4 , помещают цинковый и медный электроды (рис. 60.2). Атомы цинка активнее взаимодействуют с серной кислотой, и ионы цинка вырываются из цинкового электрода, замещая H_2 в молекуле H_2SO_4 . Поэтому цинковый электрод, потеряв положительный ион, заряжается отрицательно. Медь же практически не взаимодействует с молекулами H_2SO_4 . Поэтому между медным и цинковым электродами возникает разность потенциалов. Если источник тока не замкнут, то в этом элементе между медным электродом и электролитом возникает разность потенциалов порядка 0,5 В, а между цинковым электродом и электролитом — порядка 0,7 В. В итоге ЭДС такого источника тока составляет около 1,2 В и не зависит ни от расстояния между электродами, ни от площади электродов, а будет определяться только химическими свойствами веществ, из которых изготовлен данный элемент.

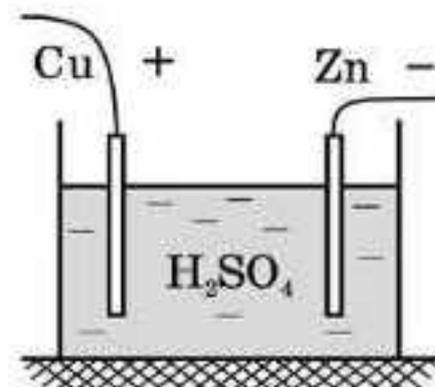


Рис. 60.2



Рис. 60.3

Рассмотрим участок металлического проводника ab , по которому идет ток в направлении от точки a к точке b . Потенциалы этих точек равны, соответственно, ϕ_a и ϕ_b (рис. 60.3). Опыт показывает: если проводник

поддерживать при одной и той же температуре, то сила текущего по нему тока оказывается пропорциональной разности потенциалов: $I = kU$, где $U = \phi_a - \phi_b$ (вспомните 8 класс).

Коэффициент пропорциональности k зависит от рода материала проводника, его геометрических размеров. Немецкий физик Г. С. Ом (1787—1854), открывший эту зависимость в 1827 г., ввел вместо коэффициента k величину, обратную ему, $R = \frac{1}{k}$ — и назвал ее *сопротивление проводника*. В честь Г. С. Ома сопротивление измеряют в **омах (Ом)**.

1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении между концами 1 В течет ток силой 1 А. С учетом этого получаем:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (60.5)$$

Это — математическая запись **закона Ома** для участка цепи, суть которого в следующем: сила тока, текущего по участку цепи, прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна его сопротивлению.

Зависимость силы тока в проводнике от напряжения на нем называется **вольтамперной характеристикой** (рис. 60.4).

Докажите, что у проводника 2 (рис. 60.4) сопротивление больше, чем у проводника 1.

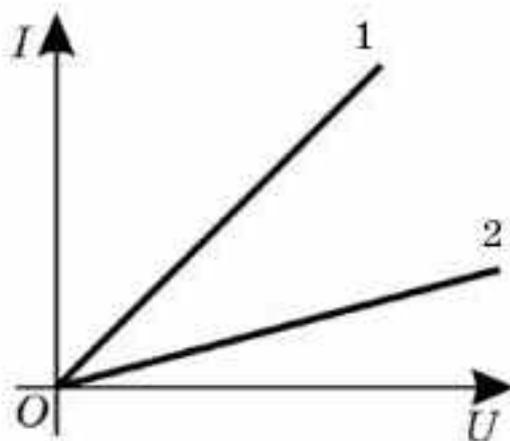


Рис. 60.4

Под **сопротивлением проводника** понимают физическую величину, которая показывает, как данный проводник препятствует прохождению тока через него.

Экспериментально было доказано, что сопротивление металлического проводника зависит от его длины l , площади поперечного сечения S и рода вещества, из которого изготовлен проводник, т. е.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (60.6)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника.

Удельное сопротивление — это физическая величина, определяемая сопротивлением проводника единичной длины и единичного сечения. Значение удельного сопротивления вычисляют при 0 °С и заносят в таблицу.

Как показал опыт, *удельное сопротивление зависит от температуры проводника*. Эта зависимость выглядит так:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (60.7)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления, имеющий различные значения для разных веществ и зависящий от их внутреннего строения.

Подставив значения из выражения (60.7) в формулу (60.6), получим:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho_0(1 + \alpha t) \frac{l}{S} = R_0(1 + \alpha t), \quad (60.8)$$

где $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ — сопротивление данного проводника при 0°C .

Попробуйте самостоятельно объяснить наличие сопротивления у проводников, исходя из электронной теории.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие условия необходимо выполнить, чтобы в цепи шел электрический ток?
2. Какую физическую величину называют *плотностью тока*?
3. Какие силы называются *сторонними*?
4. Каков физический смысл электродвижущей силы источника тока?
5. Что вы понимаете под *внутренним сопротивлением источника тока*?
6. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
7. На основе электронной теории объясните природу возникновения электрического сопротивления. Почему у разных веществ электрическое сопротивление различное?
8. Каков физический смысл удельного сопротивления?
9. Как изменится сопротивление проводника, если его длину увеличить вдвое, а диаметр уменьшить втрое?
10. Как изменяется сопротивление проводников с ростом температуры? Почему?
11. Что называется *температурным коэффициентом сопротивления*?

Творческая мастерская

Наблюдайте

Зарядите кондукторы электроскопа разноименными зарядами и соедините их металлическим проводником, в разрыв которого включена лампочка с малым сопротивлением и рассчитанная на небольшое напряжение. Наблюдайте явление и объясните его.

Объясните

1. Почему стекло не проводит ток, а медь его проводит?
2. Две лампы подключены к одному источнику тока, но светятся разным накалом. Почему? Рассмотреть разные случаи включения.
3. В трамвае ток идет по воздушному проводу, двигателю вагона и рельсу. Одинакова ли сила тока в тонком проводе и толстом рельсе?

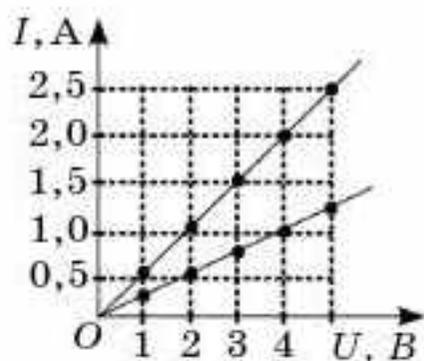


Рис. 60.5

4. Объясните, с чем связан разный наклон линий зависимости силы тока от напряжения (см. рис. 60.5).

5. Электрический ток в металлическом проводнике представляет собой направленное движение свободных электронов, сталкивающихся с ионами, из которых построена кристаллическая решетка металла, и отдающих при этом ионам энергию и импульс, которые они приобрели до соударения. Почему же металлический проводник, по которому идет ток, не испытывает никаких механических воздействий в направлении движения электронов?

Исследуйте

1. Дан график зависимости заряда, идущего по проводнику, от времени $I(t)$ (рис. 60.6). Исследуйте характер изменения силы тока. Укажите промежутки времени, когда по проводнику шел постоянный ток. Определите величину силы тока в проводнике. Какой заряд прошел по проводнику за 8 с?
2. Дан график зависимости силы тока от времени $I(t)$ (рис. 60.7). Исследуйте характер изменения силы тока. Какой заряд протечет по проводнику за 3 с и 6 с?

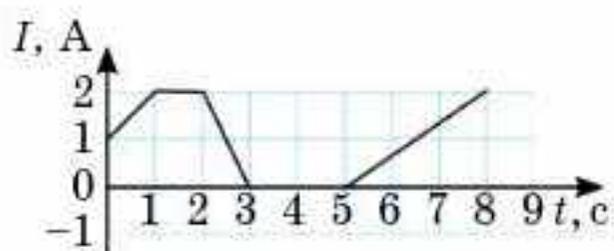


Рис. 60.6

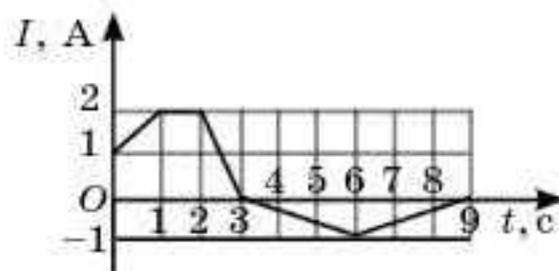


Рис. 60.7

Анализируйте

1. На каких рисунках, 60.8, а или 60.8, б, показано верное соединение амперметра и вольтметра?
2. Как изменится сила тока, протекающего через амперметр при замыкании ключа (рис. 60.9), если $U_{AB} = \text{const}$? Сопротивлением амперметра пренебречь.

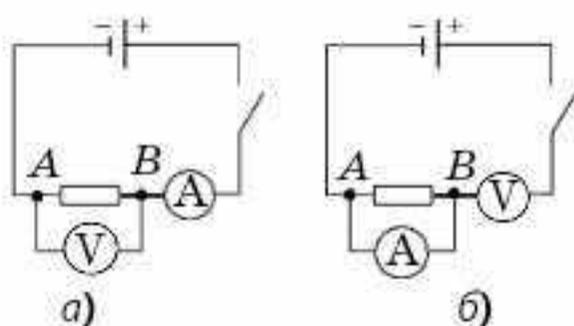


Рис. 60.8

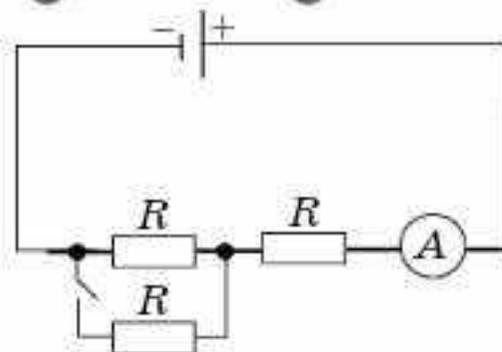


Рис. 60.9

Творите

1. Начертите схему электрической цепи, состоящей из батареи и двух ламп, каждую из которых можно включать независимо друг от друга.
2. В квартире есть длинный коридор, в котором только одна лампочка. Придумайте схему включения лампочки и двух выключателей, чтобы лампочку можно было включить при входе в квартиру и выключить при выходе из комнаты.

Решайте

1. Определите показания амперметра, если напряжение между точками A и B равно 24 В, а сопротивление участка AB равно 6 Ом (рис. 60.8, а).

(Ответ: 4 А)

2. Определите сопротивление алюминиевого провода длиной 51,5 м и массой 200 г.

(Ответ: 1 Ом)

3. К концам стального и алюминиевого проводников одного сечения и массы приложены одинаковые напряжения. В каком проводнике сила тока больше и во сколько раз?

(Ответ: $\frac{I_{ал}}{I_{ст}} \approx 1,5$)

4. По графику зависимости силы тока от напряжения на участке цепи (рис. 60.10) определите сопротивление этого участка.

(Ответ: 50 Ом)

5. Сила тока в спирали электрокипятильника, включенного в сеть напряжением 220 В, равна 4 А. Какова длина нихромовой проволоки, из которой изготовлена спираль, если ее сечение 0,1 мм²?

(Ответ: 40 см)

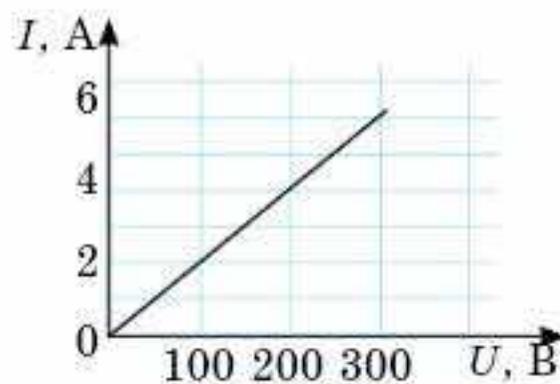


Рис. 60.10

Рефлексия

1. Выберите утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял, могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущали себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.
3. Выразить свое отношение к прочитанному одним словом: увлечен; полезно; заинтересован; нужно; узнал и т.д.

§ 61. Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи. Закон Ома для полной цепи



Ключевые понятия: последовательное и параллельное соединения проводников и их признаки, закон Ома для полной цепи, короткое замыкание.

На этом уроке вы: узнаете и научитесь различать последовательное и параллельное соединения, закон Ома для полной цепи.

Последовательное соединение проводников. Рассмотрим участок цепи, не содержащий узлов и источников тока. *Узлом называется точка, в которой сходится не менее трех проводников.*

Пусть на этом участке имеется n проводников (рис. 61.1). Мы получили их последовательное соединение. При этом соединении через каждый проводник течет ток одинаковой силы, так как нет разветвлений.

Разность потенциалов между началом участка и его концом равна: $\phi_1 - \phi_n = (\phi_1 - \phi_2) + (\phi_2 - \phi_3) + \dots + (\phi_{n-1} - \phi_n)$ или $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.

Из закона Ома для участка цепи имеем: $U = IR$, $U_1 = IR_1$ и т. д. Тогда получим, что эквивалентное сопротивление участка равно:

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

Отсюда получаем признаки последовательного соединения проводников:

1. $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$.
2. $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.
3. $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.
4. $U_1 : U_2 : \dots : U_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n$. (61.1)

Иначе можно сказать, что при последовательном соединении:

- 1) сила тока во всех проводниках одинаковая;
- 2) общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных проводниках;
- 3) общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных проводников.
- 4) падение напряжения на проводниках прямо пропорционально величине сопротивления проводника.

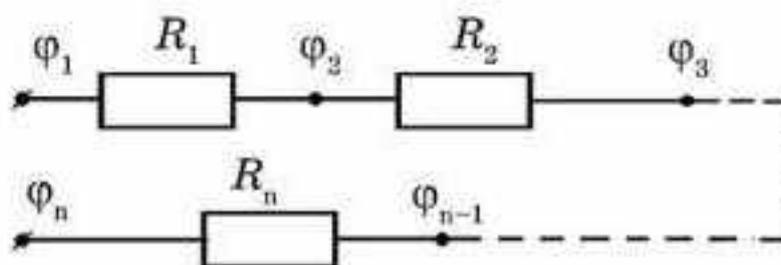


Рис. 61.1

Параллельное соединение проводников. При параллельном соединении начала и концы проводников сходятся в два узла (рис. 61.2). Очевидно, что сила тока, втекающего в узел a , равна сумме токов, вытекающих из него:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (61.2)$$

Поскольку напряжение $U = \phi_a - \phi_b$ на каждом резисторе одинаково, то, согласно закону Ома, $I = \frac{U}{R}$; $I_1 = \frac{U}{R_1}$. Подставляя значения токов в (61.2), получим:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad (61.3)$$

где R — эквивалентное сопротивление участка цепи.

Объединяя полученные выражения, выведем признаки параллельного соединения проводников:

1. $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n.$

2. $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$

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

4. $I_1 : I_2 : \dots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n}.$ (61.4)

Иначе говоря, при параллельном соединении:

1) падение напряжения на каждом проводнике одинаково и равно общему напряжению на данном участке цепи;

2) сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме токов, идущих через каждый проводник;

3) величина, обратная общему сопротивлению, равна сумме обратных величин сопротивления каждого проводника;

4) силы токов, идущих через проводники, относятся друг к другу так же, как относятся величины, обратные сопротивлениям этих проводников.

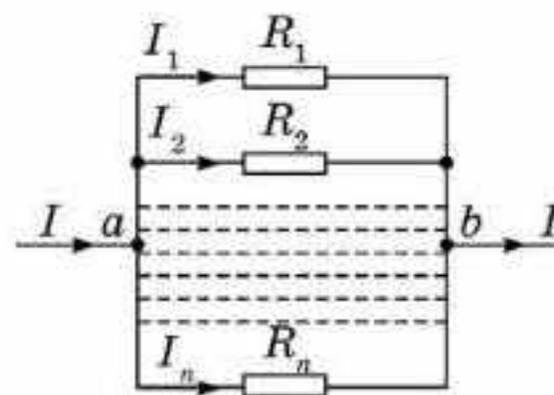


Рис. 61.2

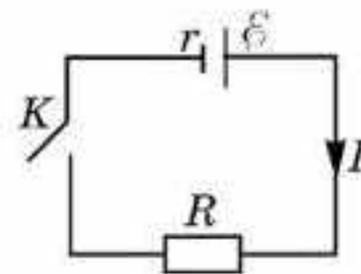


Рис. 61.3

Рассмотрим процессы, происходящие в замкнутой цепи, которая состоит из источника тока с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r , потребителя с сопротивлением R и ключа K (рис. 61.3). После замыкания ключа K по цепи идет ток силой I . За счет работы сторонних сил внутри источника тока $A_{ст} = q\mathcal{E}$ возникает электрическое поле, которое совершает работу по перемещению заряда и во внешней цепи (на потребителя) $A_{эл1} = U_R \cdot q$, и во внутренней цепи (внутри источника тока) $A_{эл2} = U_r \cdot q$. Согласно закону сохранения энергии, имеем:

$$A_{ст} = A_{эл1} + A_{эл2}, \text{ или } \mathcal{E}q = U_R q + U_r q, \text{ т. е. } \mathcal{E} = U_R + U_r. \quad (61.5)$$

Из формулы (61.5) следует, что ЭДС равно сумме падений напряжения на внешнем и внутреннем участках цепи.

Так как $U_R = I \cdot R$ и $U_r = I \cdot r$, то из формулы (61.5) следует:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (61.6)$$

Это соотношение является математической записью закона Ома для полной (замкнутой) цепи: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна величине электродвижущей силы источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи, равному сумме сопротивлений внешней и внутренней цепи.

Рассмотрим два крайних случая закона Ома для полной цепи.

1. Пусть сопротивление внешней цепи R много больше сопротивления источника тока. Поскольку $R \gg r$, получим

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}, \text{ или } \mathcal{E} = IR, \text{ т. е. } \mathcal{E} = U. \quad (61.7)$$

Это означает, что напряжение на внешней цепи приблизительно равно ЭДС источника. Именно этого и добиваются, собирая электрическую цепь.

2. Пусть сопротивление внешней цепи равно нулю $R = 0$. Тогда, согласно формуле (61.6), получим:

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (61.8)$$

Это явление получило название *короткое замыкание*. При этом сила тока в цепи максимальна, а падение напряжения на внешней цепи равно нулю ($R \rightarrow 0$). В этом случае вся работа электрического поля совершается во внутренней цепи (внутри источника тока). Необходимо помнить, что сила тока при коротком замыкании велика, поэтому возникает опасность выхода из строя источника тока.



Вопросы для самоконтроля

1. Какое соединение проводников называется *последовательным*?
2. Назовите признаки последовательного соединения проводников.
3. Каким образом находится общее сопротивление при последовательном соединении проводников?
4. Какое соединение проводников называется *параллельным*?
5. Каковы признаки параллельного соединения проводников?
6. Каким образом находится общее сопротивление при параллельном соединении проводников?
7. Как изменится сопротивление проводника, если его сложить пополам?
8. Какая цепь называется *замкнутой*, или *полной*?
9. Какому закону подчиняется прохождение тока по замкнутой цепи? Сформулируйте его.
10. Запишите закон Ома для полной цепи в следующих случаях: а) сопротивление нагрузки много больше сопротивления источника тока; б) клеммы источника замкнуты накоротко.
11. При коротком замыкании лампы в помещении гаснут. Почему? Перегорели?

Примеры решения задач

1. Как изменится сила тока, протекающего через амперметр при замыкании ключа (рис. 61.4), если $U_{AB} = \text{const}$? Сопротивлением амперметра пренебречь.

Решение. До замыкания ключа ток шел через два резистора, общее сопротивление которых $R_1 = 2R$ (соединение последовательное) и сила тока будет равна $I_1 = \frac{U_{AB}}{2R}$. После замыкания ключа ток идет только через один резистор (первый резистор закорочен). Поэтому сила тока в цепи будет равна $I_2 = \frac{U_{AB}}{R}$. Тогда $I_2 = 2I_1$, т. е. вырастет в два раза.

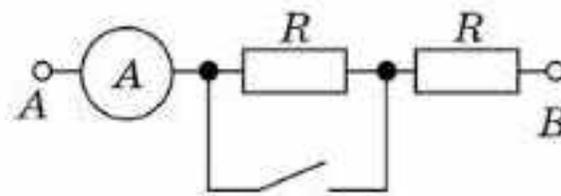


Рис. 61.4

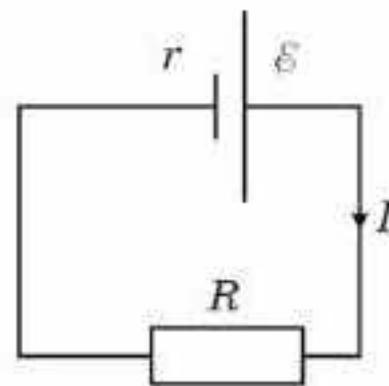


Рис. 61.5

2. Каково напряжение на полюсах источника тока с ЭДС 4 В (рис. 61.5), если сопротивление внешней части цепи в 3 раза больше внутреннего сопротивления источника?

Решение. Силу тока в цепи можно найти как по закону Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$, так и по закону Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$. Эти токи одинаковые. $\frac{U}{3r} = \frac{\mathcal{E}}{4R}$, отсюда $U = \frac{3}{4}\mathcal{E} = 3\text{В}$.

3. Медный и алюминиевый проводники имеют одинаковые массы и сопротивления. Какой проводник длиннее и во сколько раз?

Решение. Массу и сопротивление проводников найдем по формулам: $m_1 = \rho_1 S_1 l_1$ и $m_2 = \rho_2 S_2 l_2$; $R_1 = \rho_{\alpha_1} \frac{l_1}{S_1}$ и $R_2 = \rho_{\alpha_2} \frac{l_2}{S_2}$ или $m_1 R_1 = \rho_1 \rho_{\alpha_1} l_1^2$ и $m_2 R_2 = \rho_2 \rho_{\alpha_2} l_2^2$. Так как $m_1 R_1 = m_2 R_2$, тогда $\frac{l_2}{l_1} = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_{\alpha_1}}{\rho_2 \rho_{\alpha_2}}} = 1,45$.

Алюминиевый проводник в 1,45 раза длиннее.

4. Электрический чайник имеет две обмотки. При включении первой из них вода закипает через 12 мин, при включении другой — через 24 мин. Через какое время закипит вода в чайнике, если включить обе обмотки последовательно?

Решение. Количество теплоты каждый раз выделяется одинаковое: $Q_1 = Q_2$; $Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t_1$ и $Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t_2$. Тогда $R_2 = R_1 \frac{t_2}{t_1}$, $Q_3 = \frac{U^2 t_3}{R_1 + R_2} = \frac{U^2 t_3}{R_1 + R_1 \frac{t_2}{t_1}} = \frac{U^2 t_3 t_1}{R_1 (t_1 + t_2)}$, так как $Q_3 = Q_1$, то $\frac{U^2 t_3 t_1}{R_1 (t_1 + t_2)} = \frac{U^2 t_1}{R_1}$, отсюда $t_3 = t_1 + t_2 = 36$ мин.

5. Четыре сопротивления, номиналы которых указаны на рисунке, соединены двумя различными способами (рис. 61.6). Во сколько раз сопротивление участка цепи AB больше сопротивления участка цепи CD ?

Решение. $R_{AB} = 4R$; $R_{CD} = \frac{\frac{3}{2}R \cdot R}{\frac{3}{2}R + R} = \frac{3}{5}R$,

тогда $\frac{R_{AB}}{R_{CD}} = \frac{4R}{\frac{3}{5}R} = \frac{20}{3} = 6,67$.

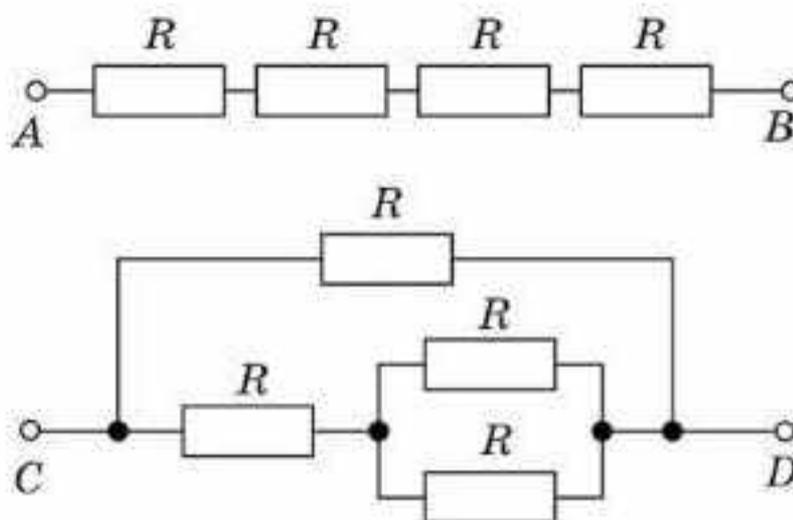


Рис. 61.6

6. Лампочки, сопротивление которых $R_1 = 6$ Ом и $R_2 = 1,5$ Ом, поочередно подключенные к некоторому источнику тока, потребляют одинаковую мощность. Найдите внутреннее сопротивление источника.

Решение. Мощность, потребляемая лампочками, находится по формуле $P = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}$; так как $P_1 = P_2$, то $\frac{\mathcal{E}^2 R_1}{(R_1 + r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2 R_2}{(R_2 + r)^2}$, отсюда

$$\frac{R_2 + r}{R_1 + r} = \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}}; \text{ тогда } R_2 \sqrt{R_1} + r \sqrt{R_1} = R_1 \sqrt{R_2} + r \sqrt{R_2};$$

$$r(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}) = \sqrt{R_1 R_2} (\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}), \text{ т. е. } r = \sqrt{R_1 R_2} = 3 \text{ Ом.}$$

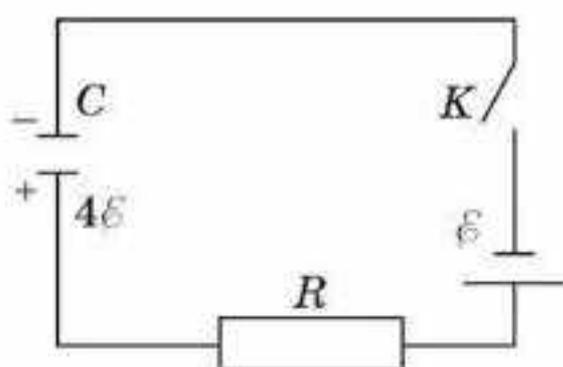


Рис. 61.7

7. Конденсатор емкостью C , заряженный до напряжения 4 , разряжается через резистор с большим сопротивлением R и батарею с ЭДС (рис. 61.7). Определить количество теплоты, выделившееся при разрядке конденсатора.

Решение. За все, что происходит в электрической цепи, “отвечает” источник тока.

За счет работы сторонних сил внутри источника меняется энергия конденсатора и выделяется тепло на резисторе R , т. е. $A_{\text{ст}} = \Delta W_c + Q$, так как $A_{\text{ст}} = \Delta q \mathcal{E} = (q_2 - q_1) \mathcal{E} = (C\mathcal{E} - C4\mathcal{E}) \mathcal{E} = -3C\mathcal{E}^2$.

$$\Delta W_c = W_{c_2} - W_{c_1} = \frac{C\varepsilon^2}{2} - \frac{C16\varepsilon^2}{2} = -\frac{15}{2} C\varepsilon^2,$$

тогда $Q = A_{ct} - \Delta W_c = -3\varepsilon C^2 + 7,5C\varepsilon^2 = 4,5C\varepsilon^2$.

8. Чему равна ЭДС источника тока, если заряд конденсатора емкостью 2000 мкФ равен 15 мКл (рис. 61.8)? Сопротивление каждого резистора $R = 1$ Ом, внутреннее сопротивление источника 0,5 Ом.

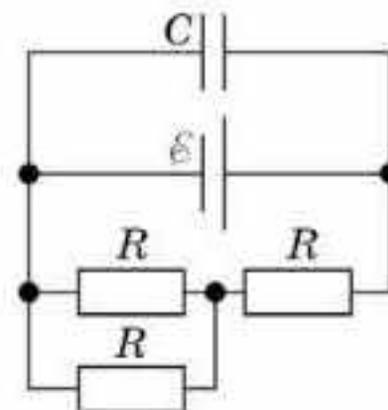


Рис. 61.8

Решение. Найдем общее сопротивление внешнего участка цепи $R_{об} = \frac{3}{2}R$. Найдем падение напряжения на внешнем участке цепи:

$$U = I \cdot \frac{3}{2}R. \text{ Так как } I = \frac{\varepsilon}{\frac{3}{2}R + r}, \text{ то } \varepsilon = \left(\frac{3}{2}R + r\right) \frac{U}{\frac{3}{2}R} = \frac{(3R + 2r)U}{3R}.$$

Конденсатор присоединен параллельно к внешнему участку цепи, т. е. $U_c = U$, а $U_c = \frac{q}{C}$. Тогда:

$$\varepsilon = \frac{3R + 2r}{3R} \cdot \frac{q}{C}; \quad \varepsilon = \frac{(3 + 1) \text{ Ом}}{3 \text{ Ом}} \cdot \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}} \cdot 100 \text{ В}.$$

9. Трамвай движется равномерно со скоростью 10 м/с при силе тяги двигателя 25 кН и КПД 90%. Какова сила тока, если напряжение в линии 550 В?

Решение. Задачи, в которых упоминается КПД механизма, удобнее начинать решать с определения КПД:

$$\eta = \frac{A_{п}}{A_{з}}, \text{ так как } A_{п} = F_T \cdot s \text{ — полезная работа, если } A_{з} = UI t \text{ — работа}$$

тока, за счет которой трамвай и может двигаться, то $\eta = \frac{F_T \cdot s}{UI t} = \frac{F_T \cdot v}{UI}$;

отсюда $I = \frac{F_T \cdot v}{U\eta} \approx 500 \text{ А}.$

Творческая мастерская

Экспериментируйте

1. Соберите электрическую цепь из последовательно соединенных источника тока, лампочки и реостата. Меняя положение ползунка реостата, наблюдаем за накалом лампочки. Делаем выводы.
2. Предложите план эксперимента по определению удельного сопротивления проводника. Какое оборудование необходимо для этого? Какие измерения надо сделать?

Объясните

1. Почему при коротком замыкании лампы в комнате гаснут? Возможно, они перегорели?
2. Почему при коротком замыкании напряжение на клеммах источника близко к нулю, хотя сила тока в цепи максимальна?
3. Вольтметр подключен к зажимам источника тока с ЭДС 9 В. Какими будут показания вольтметра, если: а) к клеммам не подключена нагрузка; б) клеммы источника замкнуты очень короткой проволокой; в) клеммы источника замкнуты проволокой с сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению источника?

Анализируйте

1. Елочная гирлянда спаяна из лампочек, рассчитанных на 3 В и включена в сеть напряжением 220 В. Одна из лампочек перегорела и ее заменили лампой, рассчитанной на 127 В. Что произойдет с накалом других лампочек и почему?
2. Имеется аккумулятор, ЭДС и внутреннее сопротивление которого неизвестны, амперметр, соединительные провода и два резистора с известным и неизвестным сопротивлением. Предложите способ определения величины неизвестного сопротивления. Приведите расчеты.

Творите

Придумайте задачу практического содержания на расчет сопротивления при смешанном соединении проводников.

Решайте

1. Как изменится сила тока, протекающего через амперметр при замыкании ключа (рис. 61.9), если $U_{AB} = \text{const}$? Сопротивлением амперметра пренебречь.

(Ответ: увеличится в 2 раза)

2. Четыре одинаковых сопротивления соединены двумя различными способами (рис. 61.10). Во сколько раз сопротивление участка цепи АВ больше сопротивления участка цепи CD.

(Ответ: $\frac{R_1}{R_2} = 6,67$)

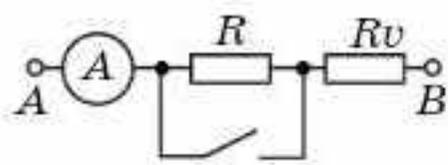


Рис. 61.9

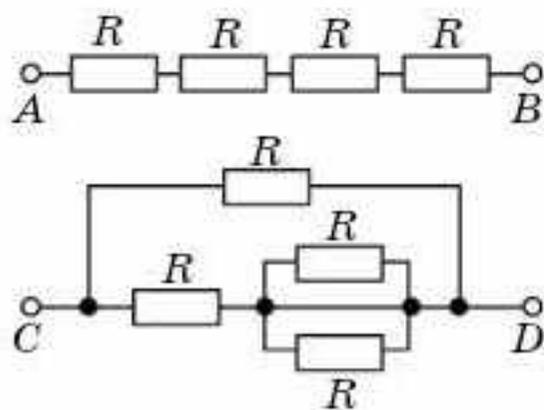


Рис. 61.10

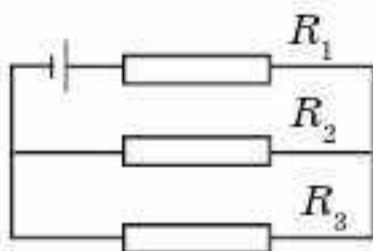


Рис. 61.11

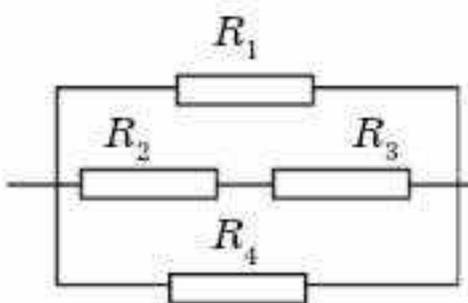


Рис. 61.12

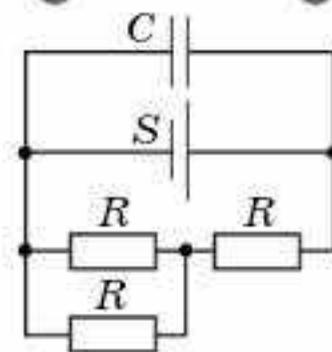


Рис. 61.13

3. Какова ЭДС элемента, если при измерении напряжения на его зажимах вольтметром с внутренним сопротивлением 20 Ом мы получаем 1,37 В, а при замыкании элемента на резистор с сопротивлением 10 Ом получаем ток 0,132 А?

(Ответ: 1,4 В)

■4. Гальванический элемент дает на внешнее сопротивление 4 Ом ток 0,2 А. Если же внешнее сопротивление равно 7 Ом, то элемент дает ток 0,14 А. Какой ток дает элемент, если его замкнуть накоротко?

(Ответ: 0,47 А)

■5. Лампочку, рассчитанную на напряжение 5 В и силу тока 0,25 А, подключают к источнику постоянного напряжения 12 В последовательно с реостатом. Можно ли установить ползунок реостата в такое положение, чтобы лампочка горела нормальным накалом, если реостат изготовлен из никелиновой проволоки длиной 10 м с площадью сечения 0,1 мм².

(Ответ: можно, включив реостат на 2/3 его длины)

6. Найдите силу тока в каждом резисторе, если $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 60$ Ом, а напряжение источника тока 132 В (рис. 61.11).

(Ответ: $I_1 = 3$ А; $I_2 = 1,8$ А; $I_3 = 1,2$ А)

7. Лампа, рассчитанная на напряжение 36 В и ток 2 А, включена в сеть с напряжением 127 В, через реостат, изготовленный из константановой проволоки сечением 2 мм². Определите сопротивление реостата и длину проволоки, необходимой для его изготовления.

(Ответ: $R = 45,5$ Ом; 182 м)

8. Чему равно общее сопротивление участка цепи, если $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 24$ Ом (рис. 61.12). Какой ток идет по резистору R_4 , если напряжение на всем участке цепи равно 120 В?

(Ответ: 1,41 Ом; 5 А)

*9. Чему равна ЭДС источника тока, если заряд конденсатора емкостью $C = 200$ мкФ равен $q = 15$ мКл (рис. 61.13)? Сопротивление каждого резистора $R = 1$ Ом, внутреннее сопротивление источника $r = 0,5$ Ом.

(Ответ: 10 В)



Рефлексия

1. Выберите утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял, могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный, хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущали себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.
3. Выразить свое отношение к прочитанному одним словом: увлечен; полезно; заинтересован; нужно; узнал и т. д.

§ 62. Правила Кирхгофа



Ключевые понятия: правила Кирхгофа.

На этом уроке вы: научитесь применять правила Кирхгофа к разветвленным электрическим цепям.

При расчете цепей удобно применять правила Кирхгофа, которые являются несложным обобщением закона Ома.

В общем случае в цепи можно найти точки, называемые *узлами*, в которых сходится не менее трех проводников. Очевидно, любой заряд, покинувший один элемент цепи, должен входить в какой-либо другой ее элемент. Поскольку в узлах токи разветвляются, то из закона сохранения заряда следует условие непрерывности токов: *сумма сил токов, входящих в узел, равна сумме сил токов, выходящих из него:*

$$\sum_{\text{вход}} I_i = \sum_{\text{выход}} I_i. \quad (62.1)$$

Направления токов мы заранее не знаем. Поэтому следует произвольно задать положительные направления токам и ввести обозначения I_k для тока, текущего в положительном направлении. Если в результате решения для какого-либо тока I_k получится отрицательное значение, то это означает, что на данном участке цепи в действительности ток течет в направлении, обратном выбранному.

Соотношение (62.1) называется *первым правилом Кирхгофа*.

Второе правило Кирхгофа относится к произвольным замкнутым контурам, которые можно выделить в данной цепи. Оно гласит: *в любом замкнутом контуре сумма падений напряжения на сопротивлениях равна сумме ЭДС, имеющих в этом контуре:*

$$\sum \mathcal{E}_i = U_i. \quad (62.2)$$

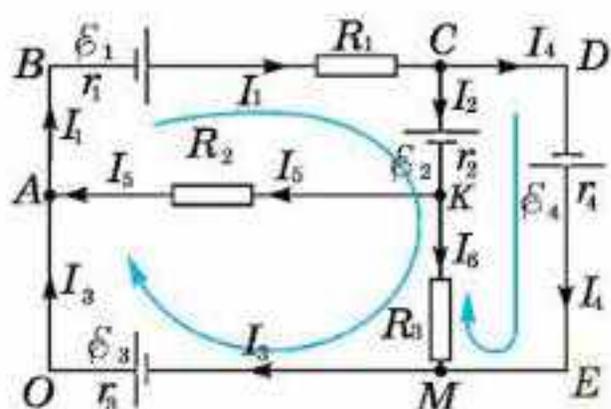


Рис. 62.1

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока и в проводниках считается положительным, если направление обхода на данном участке совпадает с положительным направлением тока. ЭДС берется с положительным знаком, если обход источника тока начинается с отрицательного полюса и заканчивается на положительном полюсе. При обходе источника тока от положительного полюса к отрицательному ЭДС следует брать со знаком “минус”.

Например, для схемы, изображенной на рисунке 62.1, имеем:

Например, для схемы, изображенной на рисунке 62.1, имеем:

$$\text{для узла A: } I_3 + I_5 = I_1;$$

$$\text{для узла C: } I_1 = I_2 + I_4;$$

$$\text{для узла M: } I_4 + I_6 = I_3;$$

для контура $BCKMOAB$ (обход по часовой стрелке):

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = I_1 r_1 + I_1 R_1 + I_2 r_2 + I_6 R_3 + I_3 r_3;$$

для контура $CDEMC$:

$$\mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_2 = I_4 r_4 - I_6 R_3 - I_2 r_2.$$

При составлении уравнений нужно помнить, что на первое правило Кирхгофа составляется уравнений на одно меньше, чем число узлов в схеме. Остальные уравнения составляются, используя второе правило Кирхгофа. Затем, решая полученную систему уравнений, определяют неизвестные величины.

При решении задач рекомендуется следующий порядок расчета разветвленной цепи постоянного тока:

1. Произвольно выбрать и обозначить на схеме цепи направления токов на всех участках цепи. При составлении уравнений по первому правилу Кирхгофа направления токов в ветвях электрической цепи *выбирают произвольно*.

2. Подсчитать число n узлов в цепи. Записать выражения первого закона Кирхгофа для каждого из $(n - 1)$ узлов.

3. Выделить в разветвленной цепи все возможные замкнутые контуры и, условившись о направлении обхода, записать уравнения второго закона Кирхгофа для контуров, но не для всех, а лишь для некоторых из них, так как эти уравнения для части контуров являются следствием таких же уравнений для остальных контуров. При составлении этих уравнений контуры следует выбирать так, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок цепи, не входящий в уже рассмотренные контуры.

4. Если в результате расчетов получается отрицательное значение силы тока в каком-либо участке цепи, то это означает, что электрический ток в действительности идет в направлении, противоположном тому, которое выбрано в начале расчета.

Таким образом, число независимых уравнений, составленных в соответствии с первым и вторым правилами Кирхгофа, оказывается равным числу различных токов, текущих в разветвленной цепи. Поэтому, если заданы ЭДС и сопротивления для всех неразветвленных участков, то могут быть найдены все токи.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие цепи называются *разветвленными*?
2. Как рассчитать сопротивление разветвленной цепи?
3. Сформулируйте первое правило Кирхгофа.
4. Сформулируйте второе правило Кирхгофа.
5. Как определить знак ЭДС источника тока и знак напряжения на сопротивлении согласно второму правилу Кирхгофа?

Творческая мастерская

Решайте

*1. Определите силу тока через резистор R_2 (рис. 62.2) и напряжение на резисторе R_2 , если ЭДС источников тока $\mathcal{E}_1 = 4$ В и $\mathcal{E}_2 = 3$ В и внутренние сопротивления $r_1 = 1$ Ом и $r_2 = 0,5$ Ом, а сопротивления резисторов $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 6$ Ом.

*2. Найдите силу тока через резистор R в схеме (рис. 62.3) и его направление, если $\mathcal{E}_1 = 1,5$ В, $\mathcal{E}_2 = 3,7$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R = 5$ Ом. Внутренние сопротивления источников тока не учитывать.

*3. Две батареи с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 10$ В и $\mathcal{E}_2 = 8$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1$ Ом и $r_2 = 2$ Ом соединены с резистором сопротивлением $R = 6$ Ом так, как показано на рисунке 62.4. Найдите силу тока, текущего через резистор R .

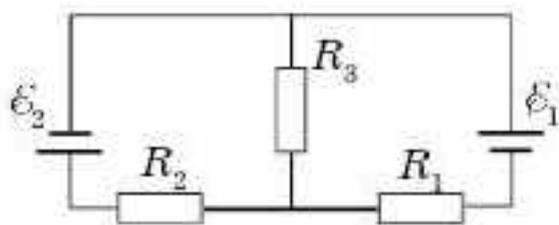


Рис. 62.2

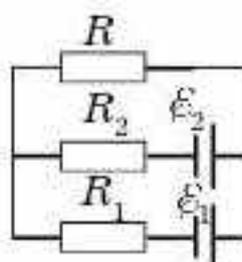


Рис. 62.3

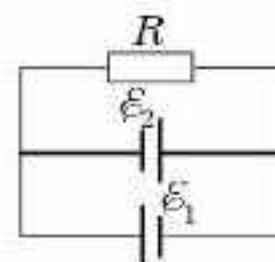


Рис. 62.4

4. Проводник длиной l разрезали на 4 части. Три части соединили параллельно, а оставшуюся часть присоединили в них последовательно. Как изменилось при этом сопротивление?

(Ответ: уменьшилось в 3 раза)

5. Лампочку, рассчитанную на напряжение 5 В и силу тока 0,25 А, подключают к источнику постоянного напряжения 26 В последовательно с реостатом. Можно ли установить ползунок реостата в такое положение, чтобы лампочка горела нормальным накалом, если реостат изготовлен из никелиновой проволоки длиной 1,0 м с площадью сечения 0,1 мм². Удельное сопротивление никелина 42 мкОм · м.

(Ответ: да, можно; ползунок надо установить посередине реостата)

Рефлексия

1. Выберите утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял, могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущали себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.
3. Выразить свое отношение к прочитанному одним словом: увлечен; полезно; заинтересован; нужно; узнал и т. д.
4. Эмоциональное состояние на протяжении урока: очень плохое; плохое; хорошее; приподнятое; комфортное; замечательное.

§ 63. Работа и мощность тока. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля — Ленца



Ключевые понятия: работа тока, тепловое действие тока, закон Джоуля — Ленца, мощность тока.

На этом уроке вы: научитесь рассчитывать работу и мощность тока, применять закон Джоуля — Ленца при расчете теплового действия тока.

Работа электрического тока. Полную работу тока на участке цепи можно найти по формуле:

$$A = Uq,$$

где U — напряжение на участке цепи; q — заряд, перенесенный через поперечное сечение проводника за время прохождения тока t . Так как $q = It$, то

$$A = UIt. \quad (63.1)$$

По этой формуле можно вычислить работу независимо от того, в какой вид энергии превращается электрическая энергия на рассматриваемом участке цепи. А это может быть превращение электрической энергии в тепловую, магнитную или химическую.

Когда электрическая энергия превращается во внутреннюю энергию (т. е. затрачивается на нагревание участка цепи), справедлива формула:

$I = \frac{U}{R}$. Подставляя это выражение в (63.1), получим другую формулу для вычисления работы тока на участке цепи без ЭДС:

$$A = \frac{U^2}{R} \cdot t. \quad (63.2)$$

Поскольку $U = IR$, то формулу (63.1) можно записать еще следующим образом:

$$A = I^2Rt. \quad (63.3)$$

Итак, при вычислении работы тока на участке цепи без ЭДС можно пользоваться любой из формул (63.1—63.3).

В СИ работа измеряется в джоулях: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$. Часто работу выражают в кВт·ч.

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Мощность электрического тока. *Мощностью называют величину, характеризующую скорость выполнения работы. Мощность тока на участке цепи измеряют работой тока, совершенной за единицу времени.* Мощность тока на участке цепи без ЭДС можно вычислять по любой из следующих формул:

$$P = \frac{A}{t}; \quad P = UI; \quad P = \frac{U^2}{R}; \quad P = I^2R. \quad (63.4)$$

Формула $P = UI$ позволяет учесть все действия тока (химические, магнитные, тепловые) и полезную мощность, а формула $P_{\tau} = I^2R$ показывает мощность тока, затрачиваемую на тепловое действие. Величину полной работы, совершаемой сторонними силами в единицу времени, называют *полной мощностью*, т. е.

$$P_{\text{полн}} = \frac{A_{\text{ст}}}{t} = \mathcal{E}I. \quad (63.5)$$

Выясним, как зависят полная и полезная мощность от величины внешнего сопротивления.

$$P_{\text{полн}} = \mathcal{E}I = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}; \quad P_{\text{полезн}} = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}.$$

График последней зависимости изображен на рисунке 63.1.

Рассмотрим работу источника тока в режиме разрядки и определим мощность тока на внешнем участке в этом случае:

$$P = U \cdot I. \text{ Так как } U = \mathcal{E} - Ir, \text{ то}$$

$$P = \mathcal{E}I - I^2r, \text{ отсюда } \mathcal{E}I = P + I^2r.$$

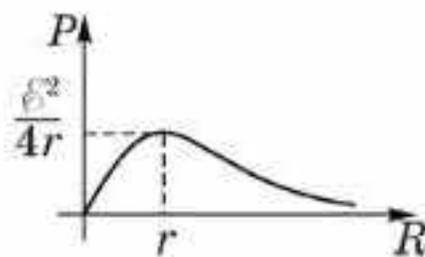


Рис. 63.1

Из чего следует, что при разрядке источника тока он отдает во внешнюю цепь мощность, равную P , и часть его мощности выделяется в виде тепла на источнике тока, т. е. величина $\mathcal{E} \cdot I = P_{\text{полн}}$ характеризует полную энергию, выделяемую источником тока за единицу времени.

В случае зарядки источник тока получает энергию извне, поэтому мощность тока может быть определена следующим образом: $P = I \cdot U$, где $U = \mathcal{E} + Ir$, тогда $P = \mathcal{E}I + I^2r$. Видно, что мощность тока (т. е. потребляемая в единицу времени энергия) частично выделяется в виде теплоты (I^2r) и частично идет на увеличение энергии источника тока.

У каждого источника тока есть свой КПД. *Под КПД источника понимают величину (η), которая показывает, какую часть работы сторонних сил источник тока превращает в полезное действие:*

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{ст}}} = \frac{UI\tau}{\mathcal{E}I\tau} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (63.6)$$

Анализ последней формулы позволяет говорить о том, что КПД источника будет максимальным при $r \ll R$. Если $r = R$, то КПД источника равен 50%.

Тепловое действие тока на опытах было изучено английским ученым Дж. Джоулем и русским физиком Э. Ленцем. Количество теплоты, выделенной током в проводнике, равно работе электрического поля по преодолению сопротивления проводника:

$$Q = A_{\tau} = I^2Rt. \quad (63.7)$$

Формула (63.7) является математическим выражением закона *Джоуля — Ленца*: количество теплоты, выделенной током в проводнике, прямо пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени его прохождения. При последовательном соединении (рис. 63.2, а) проводников с сопротивлениями R_1 и R_2 количество выделенного в них тепла можно выразить следующим образом:

$$Q_1 = I^2 R_1 t, \quad Q_2 = I^2 R_2 t,$$

откуда вытекает, что

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (63.8)$$

Следовательно, количество теплоты, выделенной током в каждом проводнике при последовательном соединении, прямо пропорционально сопротивлению этих проводников.

При параллельном соединении двух участков цепи без ЭДС с сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 63.2, б) количество тепла, выделенного током в каждом участке в отдельности, равно:

$$Q_1 = \frac{U^2 t}{R_1}; \quad Q_2 = \frac{U^2 t}{R_2},$$

откуда

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (63.9)$$

Количество теплоты, выделенной током в параллельно соединенных участках цепи без ЭДС, обратно пропорционально сопротивлению этих участков.

Из формул (63.8) и (63.9) видно, что при последовательном соединении большее количество теплоты выделяется в проводнике с большим сопротивлением, а при параллельном соединении — с меньшим.

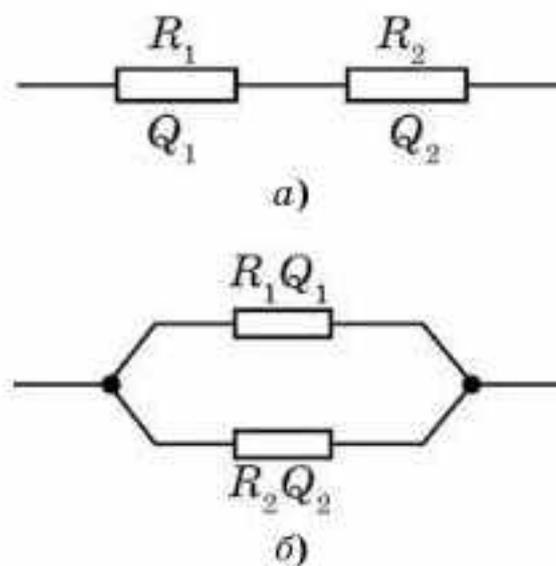


Рис. 63.2



Вопросы для самоконтроля

1. Как рассчитать работу, которую совершает ток, проходя по проводнику?
2. Что понимают под *мощностью тока*?
3. Что называется *полезной мощностью*? По какой формуле можно рассчитать полезную мощность?
4. Какая мощность называется *теряемой*? По какой формуле ее можно рассчитать?
5. Какая мощность называется *полной мощностью*?
6. Как зависят полная, полезная и теряемая мощности от величины сопротивления внешней цепи? Приведите математическое и графическое доказательство этих зависимостей.
7. Сформулируйте закон Джоуля — Ленца.
8. Как зависит количество теплоты, выделяющееся на нагрузке, от способа соединения потребителей?
9. Почему провода, подводящие ток к электроплитке, не нагреваются так же сильно, как спираль в плитке?
10. Почему спираль в электроплитке нагревается сильнее в том месте, где она тоньше?
11. Спираль электроплитки при ремонте укоротили. Изменятся ли от этого ее накал и мощность? Почему?
12. Почему в плавких предохранителях не применяют проволоку из тугоплавкого металла?

Творческая мастерская

Экспериментируйте

Включите в электрическую цепь электроплитку и амперметр. Как изменятся показания амперметра, если на раскаленную плитку направить струю холодного воздуха от вентилятора?

Объясните

1. Вследствие испарения материала с поверхности нити накала лампы сама нить с течением времени становится тоньше. Как это влияет на мощность, потребляемую лампой?

2. Плавкий предохранитель рассчитан на силу тока 5 А. Можно ли при наличии такого предохранителя включить в сеть напряжением 220 В прибор мощностью 2,4 кВт?

3. Две лампы подключены к одному источнику тока, но светятся разным накалом. Почему?

4. Почему плавкий предохранитель выходит из строя раньше, чем любой другой участок цепи?

5. Два проводника одинаковой длины из одного и того же материала, но разного сечения включены последовательно в цепь электрического тока. В каком из них будет выделяться большее количество теплоты? Как изменится ответ, если проводники включить в цепь параллельно?

6. Как надо соединить обмотки двух нагревателей, опущенных в сосуд с водой, чтобы вода закипела быстрее?

Исследуйте

Дан график зависимости силы тока, идущего по проводнику сопротивлением 400 Ом, от времени $I(t)$ (рис. 63.3). Исследуйте характер изменения силы тока. Определите количество теплоты, которое выделится в проводнике за 8 с.

Анализируйте

Ток проходит по стальной проволоке, которая при этом слегка нагревается. Если одну часть проволоки охладить, то как изменится накал другой части? Почему?

Решайте

1. Электрочайник мощностью 1500 Вт забыли выключить. Через какое время выкипит вся вода в чайнике? Объем чайника 2 л, КПД чайника 50%, начальная температура воды 20°C.

(Ответ: ≈ 2 ч)

2. По графику зависимости $I(U)$ (рис. 63.4) определите количество теплоты, выделившееся в проводнике за 4 мин при напряжении 5 В.

(Ответ: ≈ 90 Дж)

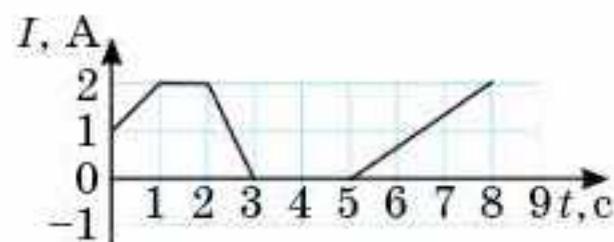


Рис. 63.3

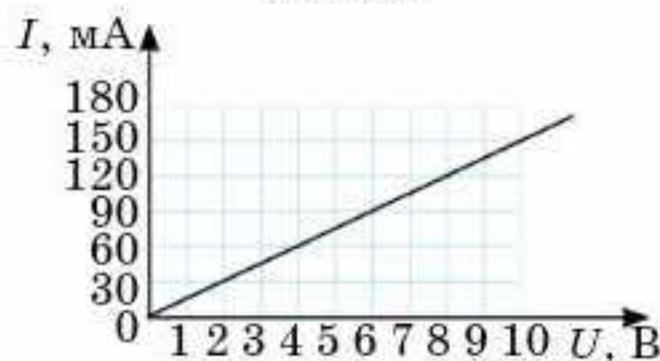


Рис. 63.4

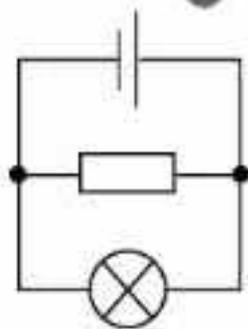


Рис. 63.5

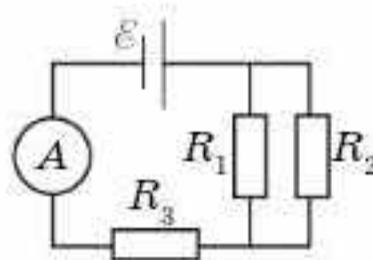


Рис. 63.6

■3. К концам алюминиевого и медного проводников одного сечения и массы приложены одинаковые напряжения. В каком проводнике сила тока больше и во сколько раз?

(Ответ: в медном в 5,43 раза)

■4. В сеть включены параллельно электрический чайник и кастрюля разной емкости, потребляющие мощности 1000 Вт и 500 Вт, соответственно. Вода комнатной температуры в них закипает одновременно через 4 мин. На сколько минут позже закипит вода в чайнике, чем в кастрюле, если их включить в ту же сеть последовательно?

(Ответ: 4,5 мин)

■5. В электрическую цепь включены лампочка и резистор (рис. 63.5). КПД источника тока 60%, его внутреннее сопротивление 1 Ом. Сила тока, текущего через источник, 1 А. Найдите напряжение на лампочке.

(Ответ: 1,5 В)

6. Спираль электрического чайника изготовлена из нихромовой проволоки сечением $0,5 \text{ мм}^2$. В чайнике находится 1,5 л воды, и он подключен к сети с напряжением 220 В. Вода в чайнике за 4 мин нагревается от 298 К до 373 К. Какова длина проволоки, если КПД чайника 75%?

(Ответ: 17 см)

7. Каковы показания амперметра, включенного в схему (рис. 63.6), если ЭДС батареи 80 В, ее внутреннее сопротивление 1 Ом? Сопротивление $R_1 = 25 \text{ Ом}$, $R_3 = 49 \text{ Ом}$. Мощность, выделяющаяся на сопротивлении $R_1 = 16 \text{ Вт}$. Сопротивлением амперметра пренебречь.

(Ответ: 2 А)



Рефлексия

1. Выберите утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял; могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущали себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.
3. Выразить свое отношение к прочитанному одним словом: увлечен; полезно; заинтересован; нужно; узнал и т. д.

Направленное или упорядоченное движение заряженных частиц называется *электрическим током*.

Для существования электрического тока необходимо наличие в среде свободных заряженных частиц и электрического поля.

Электрический ток, проходя по проводнику, оказывает тепловое, магнитное и химическое действия.

Электрический ток характеризуется *силой тока*: $I = \frac{q}{t}$.

Сила тока измеряется в амперах.

Электрический ток, проходя по участку цепи, подчиняется *закону Ома* для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R},$$

где I — сила тока на участке цепи; U — напряжение на концах этого участка; R — сопротивление этого участка цепи.

Электрическое поле, перемещая заряженные частицы по проводнику, совершает работу, которую называют *работой тока*:

$$A = UIt.$$

Ток, проходя по проводнику, нагревает его. Количество теплоты, которое при этом выделяется в проводнике, находят *по закону Джоуля — Ленца*:

$$Q = I^2Rt.$$

Мощность электрического тока определяет быстроту выполнения работы током:

$$P = \frac{A}{t} = IU.$$

Эта формула учитывает все действия тока (тепловое, магнитное, химическое).

Для замкнутой (полной) цепи справедлив *закон Ома для полной цепи*:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Глава 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 64. Электрический ток в металлах



Ключевые понятия: классическая теория электропроводности; температурный коэффициент сопротивления, термометр сопротивления, сверхпроводимость, высокотемпературная сверхпроводимость.

На этом уроке вы: ознакомитесь с опытными подтверждениями электронной природы проводимости металлов; изучите основные положения электронной теории проводимости металлов; ознакомитесь с явлением сверхпроводимости.

Эксперименты, подтверждающие электронную природу тока в металлах. Нам известно, что электрический ток в металлах обусловлен упорядоченным движением свободных электронов. Существует ряд экспериментов, которые доказывают это.

Опыт Рикке был проведен в 1901 г. Немецкий физик-экспериментатор Э. Рикке составил электрическую цепь из трех металлических цилиндров (двух медных и одного алюминиевого), которые были прижаты друг к другу тщательно отполированными торцами. Пропустив в течение года через такой составной проводник ток одного и того же направления (рис. 64.1), Рикке не обнаружил никаких следов проникновения одного металла в другой. Взвешивание показало, что пропускание тока также не повлияло на массу цилиндров. Следовательно, носителями тока в металлах являются частицы, входящие в состав всех металлов. Ими могли быть электроны, к тому времени уже открытые Томсоном.

Опыты с инерцией электронов. Чтобы убедиться в том, что носителями тока в металлах являются именно электроны, необходимо было определить знак и численное значение удельного заряда $\frac{q}{m}$ носителей. Опыт, преследующий эту цель, впервые был проведен американскими физиками Р. Толменом и Т. Стюартом в 1916 г. В опыте катушка большого диаметра с намотанным на нее металлическим проводом приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси и затем резко тормозилась (рис. 64.2). При этом в ней возникал кратковременный ток, обусловленный тем, что свободные носители заряда продолжали некоторое время двигаться

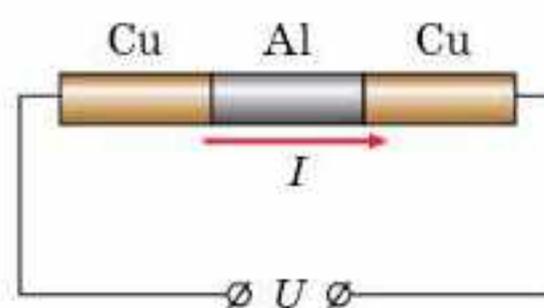


Рис. 64.1

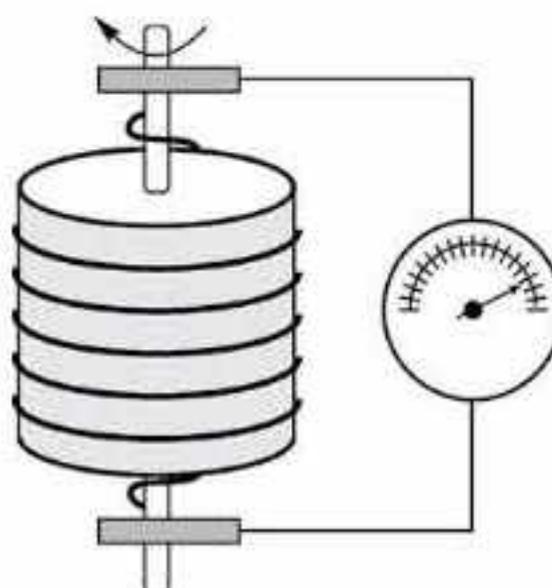


Рис. 64.2

по инерции. Ток регистрировался чувствительным гальванометром, присоединенным к концам проводника гибкими проводами при помощи скользящих контактов. В эксперименте Толменом и Стюартом было установлено, что знак носителей заряда в металлах отрицательный, а удельный заряд носителя, т. е., отношение заряда носителя q к его массе m , очень близок к удельному заряду $\frac{q}{m}$ электрона. Таким образом, опыт, проведенный Толменом и Стюартом, убедительно доказывает, что носителями тока в металлах являются свободные электроны.

Электронная теория проводимости металлов. В начале XX в. немецкий физик П. Друде (1863—1906) и голландский физик Х. Лоренц (1853—1928) создали классическую электронную теорию электропроводности металлов. Основные положения этой теории:

1. Свободные электроны в металле ведут себя как молекулы идеального газа, находясь в хаотическом и непрерывном движении. Но, в отличие от молекул газа, электроны сталкиваются не между собой, а с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. К электронному газу применимы законы молекулярно-кинетической теории идеального газа. Мы можем оценить, например, среднюю квадратичную скорость теплового движения свободных электронов по известной нам формуле $v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$, где m_e — масса электрона. Для комнатных температур средняя скорость беспорядочного движения электронов проводимости составляет порядка 10^5 м/с.

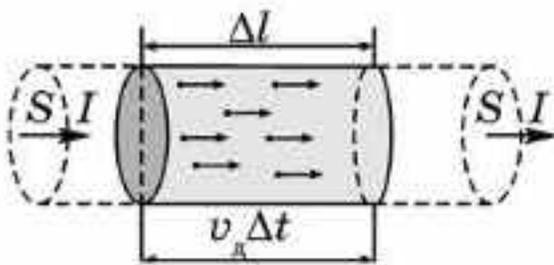


Рис. 64.3

2. При включении электрического поля на хаотическое движение электронов накладывается упорядоченное движение электронов, называемое *дрейфом* электронов, с некоторой средней скоростью v_d . Найдем величину этой скорости. Для этого внутри металлического проводника выделим цилиндр с площадью поперечного сечения S , длиной $\Delta l = v_d \Delta t$ и концентрацией свободных электронов n . Пусть ток направлен слева направо (рис. 64.3). По определению сила тока в проводнике равна

$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, где Δq — суммарный заряд всех электронов, пересекающих правый торец цилиндра за время Δt . Суммарный заряд Δq можно считать как $\Delta q = Ne$, где N — число свободных электронов внутри нашего цилиндра. Это верно, потому что все они вносят вклад в ток. Ведь даже самый удаленный электрон, двигаясь со скоростью v_d , может пересечь правый торец, преодолев за время Δt расстояние $v_d \Delta t$, равное длине цилиндра.

Тогда

$$I = \frac{Ne}{\Delta t} = \frac{nVe}{\Delta t} = \frac{n\Delta lSe}{\Delta t} = \frac{nv_d \Delta t Se}{\Delta t} = nv_d eS. \quad (64.1)$$

Отсюда скорость дрейфа свободных электронов в металле: $v_d = \frac{I}{neS}$.

3. Время τ между двумя последовательными соударениями одинаково для всех электронов и называется *временем свободного пробега*. При каждом соударении электрон полностью передает свою кинетическую энергию кристаллической решетке и после соударения начинает свое движение с нулевой начальной скоростью $v_0 = 0$.

Несмотря на то, что допущения 1—3 являются весьма приближенными, классическая электронная теория дает хорошее согласие со многими законами постоянного тока.

Объяснение закона Ома. Покажем, как, опираясь на допущения классической электронной теории, можно объяснить закон Ома. За время свободного пробега τ электрон, двигаясь под действием электрического поля равноускоренно, приобретает скорость $v_{\max} = a\tau$. Здесь мы учли то, что $v_0 = 0$.

Ускорение электрона a можно выразить через напряженность электрического поля в проводнике, воспользовавшись вторым законом Ньютона: $a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e}$. В таком случае $v_{\max} = \frac{eE}{m_e}\tau$. Мы можем рассматривать скорость дрейфа электронов v_d как среднюю скорость равноускоренного движения электрона между двумя последовательными соударениями электронов с ионами кристаллической решетки:

$$v_d = \frac{1}{2}(v_0 + v_{\max}) = \frac{1}{2}v_{\max} = \frac{eE}{2m_e}\tau.$$

Подставив найденное выражение для v_d в формулу (64.1), получим:

$$I = nev_d S = neS \frac{eE}{2m_e} \tau = \frac{ne^2 S \tau}{2m_e} E.$$

В последнем выражении запишем напряженность электрического поля E через разность потенциалов U , воспользовавшись соотношением $E = \frac{U}{l}$, где l — длина проводника. Тогда сила тока выражается соотношением:

$$I = \frac{ne^2 S \tau}{2m_e l} U. \quad (64.2)$$

Таким образом, сила тока I в проводнике оказалась прямо пропорциональной разности потенциалов U на концах этого проводника, как это и утверждается в законе Ома.

Закон Джоуля — Ленца. При прохождении тока в проводнике электроны взаимодействуют с ионами кристаллической решетки, теряя при этом энергию, которую получили от электрического поля. Энергия, сообщенная электроном проводимости решетке, идет на увеличение

внутренней энергии металлического проводника и он нагревается. Выделяемое при этом количество теплоты определяется известным нам законом Джоуля — Ленца, который тоже может быть качественно объяснен с помощью классической электронной теории.

Зависимость сопротивления металлов от температуры. Из главы 11 нам уже известно о том, что сопротивление металлов растет с температурой согласно закону $R = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 — сопротивление металлического проводника при температуре 0°C , α — температурный коэффициент сопротивления вещества (рис. 64.4). Для большинства простых металлов значения α можно считать постоянными и близкими к $0,004 \text{ K}^{-1}$.

Попробуем объяснить температурную зависимость сопротивления металлов на основе классической электронной теории проводимости. С этой целью сравним полученную выше формулу (64.2) с законом Ома $I = \frac{1}{R}U$. Очевидно, что в правой части формулы (64.2) множитель при напряжении U представляет собой величину, обратную сопротивлению проводника. В таком случае, для электрического сопротивления металлического проводника R получим:

$$R = \frac{2m_e l}{ne^2 S \tau} \tag{64.3}$$

С увеличением температуры амплитуда колебаний положительных ионов в узлах кристаллической решетки должна возрасти. Следовательно, должно возрасти и число столкновений электронов с ионами, что будет способствовать уменьшению времени свободного пробега электронов τ .

Согласно (64.3), это приведет к росту сопротивления проводника R .

Сверхпроводимость. Из рисунка 64.4 видно, что с понижением температуры сопротивление металлов уменьшается. Возникает вполне естественный вопрос: до какого предела возможно уменьшение сопротивления? Нидерландский физик Камерлинг-Оннес (1853—1926) был первым, кому удалось достичь самой низкой по тем временам температуры около 4 К. При этой температуре в жидкое состояние переходил инертный газ гелий. Эксперименты по измерению сопротивления ртути при температуре жидкого гелия, проведенные Камерлинг-Оннесом, обнаружили удивительное явление: постепенное уменьшение сопротивления ртути при охлаждении сменилось на его резкое падение до нуля (рис. 64.5). Это явление скачкообразного исчезновения сопротивления при низких температурах

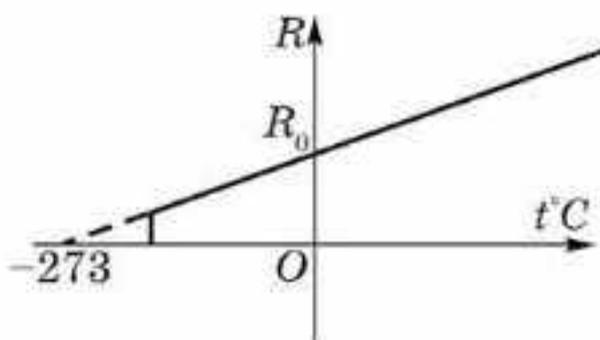


Рис. 64.4

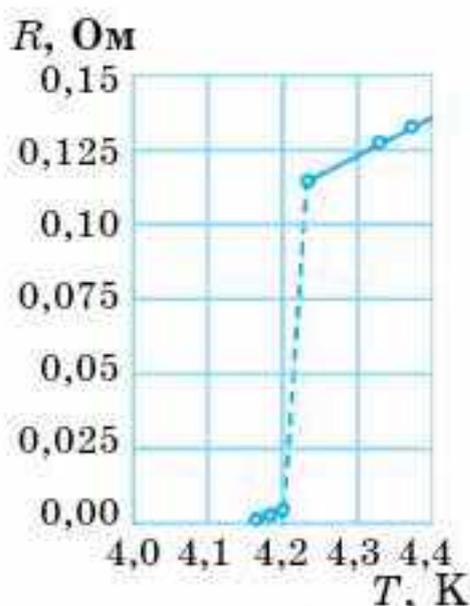


Рис. 64.5

было названо *сверхпроводимостью*. Позже оно было обнаружено и у многих других металлов и сплавов. В явлении сверхпроводимости сопротивление действительно обращалось в ноль, так как никакие опыты не могли обнаружить его наличие у металла. Например, удостовериться в отсутствии сопротивления металла в сверхпроводящем состоянии можно, если, создав ток в кольцевом проводнике, следить за стрелкой компаса, расположенного рядом со сверхпроводящим кольцом. Если положение стрелки компаса не меняется с течением времени, то это говорит о постоянстве магнитного поля, создаваемого током в кольце, что, в свою очередь, свидетельствует о том, что сам ток со временем не изменяется. Очевидно, это возможно только в случае нулевого сопротивления проводника. Позже у сверхпроводников, кроме исчезновения сопротивления, было обнаружено еще одно свойство, наступающее также при температуре перехода в сверхпроводящее состояние: *магнитное поле выталкивалось из толщи сверхпроводника*. Благодаря этим двум своим замечательным свойствам, сверхпроводимость нашла широкое применение в науке и технике. Мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой используются в ускорителях элементарных частиц, установках по термоядерному синтезу. Из сверхпроводников конструируют сверхчувствительные системы обнаружения магнитных полей, которые используются в медико-диагностических целях, например, в магнитно-резонансных томографах (МРТ). В энергетике идеальная проводимость сверхпроводников может быть использована в линиях электропередач. В недалеком будущем планируется создание поездов, в которых будет использована левитация сверхпроводника.

К сожалению, возможности широкого применения сверхпроводников ограничены в связи с низкими значениями у них температур перехода в сверхпроводящее состояние. Поэтому ученые и технологи ведут неустанный поиск сверхпроводников с высокими температурами сверхпроводящего перехода. В 1986 г. такие поиски увенчались большим успехом. Сотрудниками научного подразделения корпорации IBM К. Мюллером и Г. Беднорцем в металлооксидной керамике, содержащей лантан, барий и медь, была обнаружена *высокотемпературная сверхпроводимость* с температурой сверхпроводящего перехода около 40 К. К настоящему времени открыты материалы, которые переходят в сверхпроводящее состояние при температурах более 100 К, что превышает температуру кипения жидкого азота при атмосферном давлении 77 К.



Вопросы для самоконтроля

1. Почему все металлы — хорошие проводники?
2. Как в металлах образуются свободные электроны?
3. Почему проводимость металлов электронная?
4. Опишите поведение свободных электронов в проводнике при отсутствии внешнего электрического поля и при его наличии.
5. Сравните величину средней скорости движения электронов в металле (скорость их теплового движения) с величиной средней скорости их упорядоченного движения, вызванной действием сил электрического поля.
6. Объясните, почему с ростом температуры сопротивление металлов возрастает.
7. Какое явление называется *сверхпроводимостью*? Кем оно было открыто?

Творческая мастерская

Объясните

1. Какие экспериментальные доказательства вы можете привести в пользу электронной природы проводимости металлов?
2. Чем объясняется хорошая электро- и теплопроводность металлов?
3. При повышении температуры сопротивление металлов растет. Объясните причину такой зависимости.

Творите

1. Какой опыт вы предложили бы для того, чтобы удостовериться в том, что в сверхпроводнике в сверхпроводящем состоянии отсутствует всякое сопротивление?
2. Помимо идеальной проводимости, сверхпроводники в сверхпроводящем состоянии обладают идеальным диамагнетизмом, т. е. способностью выталкивать магнитное поле из своего объема. Предложите ваши идеи по практическому применению этих уникальных свойств сверхпроводников.

Анализируйте

Металлы отличаются от диэлектриков наличием в них свободных электронов. Однако при комнатных температурах электроны не могут полностью покинуть металл. Что этому мешает? Что способствует?

Решайте

1. Определите среднюю скорость направленного движения (дрейфа) электронов вдоль медного проводника при плотности постоянного тока 11 А/мм^2 , если считать, что на каждый атом меди в металле имеется один свободный электрон. Молярная масса меди $64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Плотность меди 8900 кг/м^3 .

(Ответ: $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$)

2. Через алюминиевый провод сечением 50 мм^2 в течение 1 ч проходит 10 Кл заряда. Считая, что на каждый атом алюминия приходится по одному свободному электрону, определите силу тока, плотность тока и среднюю скорость направленного движения (дрейфа) электронов. Плотность алюминия 2700 кг/м^3 .

(Ответ: $2,8 \text{ А}$; $5,6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$; $5,8 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$)

3. Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампы при 20°C равно $35,8 \text{ Ом}$. Какова будет температура нити лампочки, если при включении в сеть напряжением 120 В по нити идет ток $0,33 \text{ А}$? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

(Ответ: 220°C)

Рефлексия

1. Выбери утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял, могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущал себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.

§ 65. Электрический ток в полупроводниках



Ключевые понятия: электронная и дырочная проводимости; собственная проводимость полупроводников; примесная проводимость полупроводников; *p-n*-переход; полупроводниковый диод; полупроводниковый транзистор.

На этом уроке вы узнаете, что проводимость полупроводников делится на собственную и примесную; ознакомьтесь со свойствами электронно-дырочного перехода; изучите полупроводниковые приборы, работающие на основе *p-n*-перехода.

Проводники, диэлектрики, полупроводники. Все вещества по электропроводности можно разделить на три класса: *проводники* — вещества, хорошо проводящие ток [$\rho = (10^{-5} - 10^{-8}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$]; *диэлектрики* — вещества, плохо проводящие ток [$\rho = (10^8 - 10^{17}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] и *полупроводники* — вещества, проводимость которых оказалась промежуточной между проводниками и диэлектриками [$\rho = (10^4 - 10^{-5}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] (рис. 65.1). Хорошая проводимость проводников объясняется наличием в них большого числа свободных носителей заряда. Диэлектрики плохо проводят электрический ток, потому что в них практически отсутствуют свободные заряды.

Типичными полупроводниками являются элементы: кремний Si, германий Ge, селен Se, а также некоторые химические соединения, такие, как сернистый свинец PbS и арсенид галлия GaAs. Чтобы понять механизм проводимости в полупроводнике, нам необходимо выяснить, прежде всего, как связаны его атомы в кристаллической решетке.

Рассмотрим для примера кристалл германия. Германий — элемент четвертой группы в периодической системе, т. е. во внешней оболочке атома германия имеются четыре валентных электрона. Каждый атом окружен четырьмя соседними атомами. Связь между двумя соседними атомами осуществляется парой электронов, по одному от каждого атома. Связь такого типа между атомами называется *ковалентной*. Двумерная модель кристаллической решетки германия с ковалентными связями между атомами изображена на рисунке 65.2, где кружками обозначе-

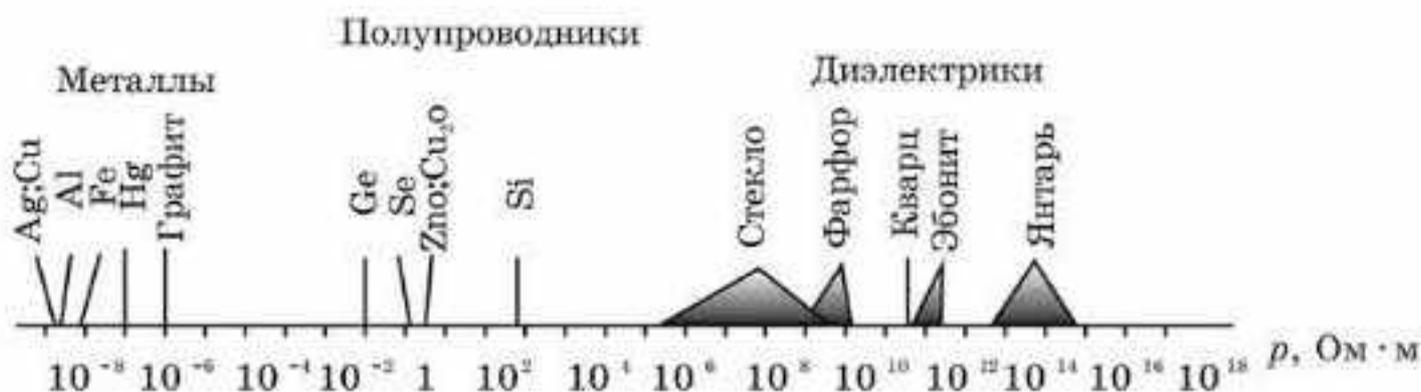


Рис. 65.1

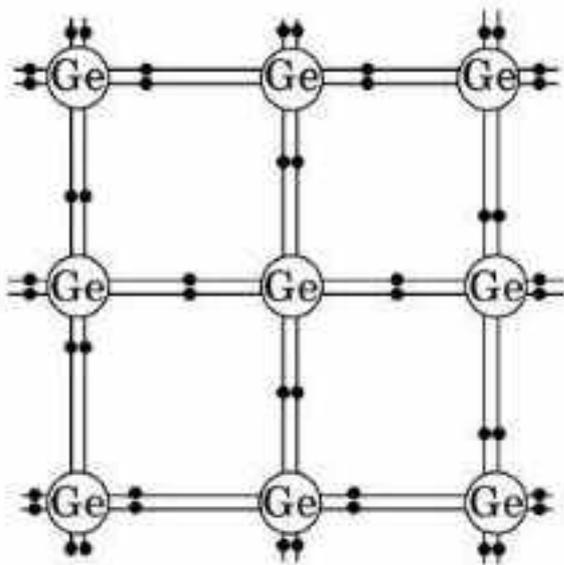


Рис. 65.2

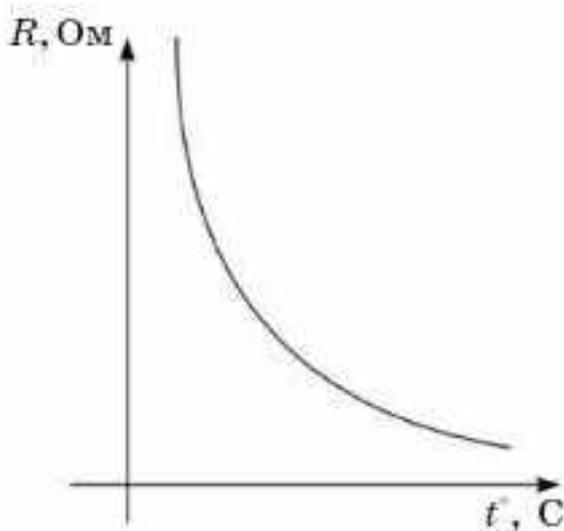


Рис. 65.3

ны атомы германия, точками — валентные электроны, линиями — электронные связи.

Однако, такая идеальная картина, когда все ковалентные связи целы и все валентные электроны задействованы в образовании межатомных связей, имеет место только для чистого, лишённого примесей, германия при очень низких температурах. При повышении температуры тепловые колебания кристаллической решетки могут привести к разрыву некоторых валентных связей, в результате чего электроны, задействованные в осуществлении этих связей, высвобождаются и становятся электронами проводимости.

График зависимости сопротивления полупроводника от температуры представлен на рисунке 65.3. Из графика видно, что при очень низких температурах, когда все электронные связи в кристалле целы и в нем отсутствуют свободные носители заряда, полупроводник ведет себя как диэлектрик с практически бесконечным сопротивлением. С ростом температуры количество свободных электронов в полупроводнике быстро увеличивается, что приводит к уменьшению его сопротивления.

Таким образом, сопротивление полупроводников при нагревании уменьшается, в отличие от металлов, у которых сопротивление с ростом температуры увеличивается. Следует отметить, что понижения сопротивления полупроводников можно добиться не только путем их нагревания, но и воздействуя на них светом. В этом случае, энергия, необходимая электрону для разрыва связи, заимствуется им из энергии излучения.

Собственная и примесная проводимость полупроводников. Мы уже показали, что с повышением температуры электроны в полупроводниках покидают свои связи, и в полупроводниках появляются свободные носители заряда.

Однако, в механизме электропроводности полупроводников участвуют не только они. Дело в том, что при разрыве ковалентной связи в кристалле возникает вакантное место с отсутствующей связью, которое обладает избыточным, по сравнению с нормальными связями, положительным зарядом. В теории полупроводников такие вакансии с положительным зарядом, равным по величине заряду электрона,

получили название *дырок*. На рисунке 65.4 дырки обозначены маленькими кружочками.

Если в кристалле имеется электрическое поле, то положение дырки в кристалле не остается неизменным. Какой-либо электрон валентной связи может перескочить на место дырки. В результате на этом месте восстанавливается связь, а дырка образуется в том месте, откуда перескочил электрон связи. В свою очередь, на место новой дырки может перескочить электрон из другой связи и т. д. Таким образом, благодаря перескоку электронов связи происходит перемещение дырок по кристаллу. Это дает нам основание говорить о наличии еще одного механизма проводимости в полупроводниках — дырочном. Итак, в переносе тока в полупроводниках могут участвовать как свободные электроны, так и дырки. *Проводимость, обусловленную перемещением свободных электронов в полупроводнике, называют электронной проводимостью, а проводимость, обусловленную перемещением дырок, — дырочной проводимостью.*

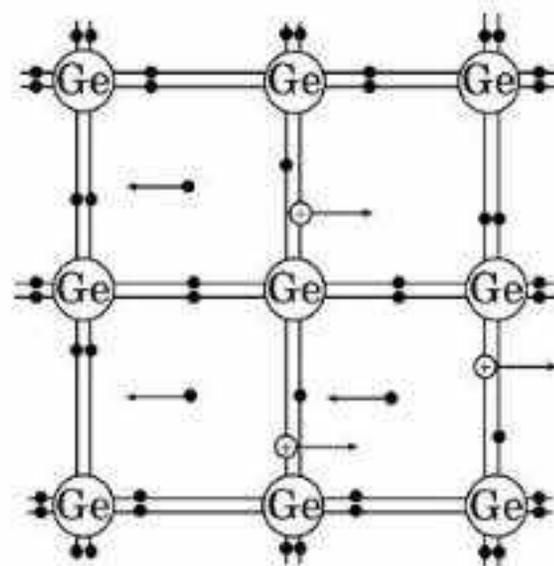


Рис. 65.4

В чистом полупроводнике всегда имеется равное количество свободных электронов и дырок. Поэтому *проводимость чистых полупроводников наполовину дырочная, а наполовину электронная. Такая проводимость называется собственной проводимостью полупроводников.*

С помощью добавления в чистый полупроводник специально подобранных примесей можно искусственно приготовить такие полупроводники, которые обладают преимущественно электронной или дырочной проводимостью.

Добавим в чистый расплавленный германий около $10^{-5}\%$ примеси, состоящей из атомов какого-либо элемента V группы таблицы Менделеева, например, мышьяка. Тогда при затвердевании образуется обычная решетка германия, но в некоторых узлах вместо атомов этого элемента будут находиться атомы мышьяка (рис. 65.5). Четыре валентных электрона атома мышьяка при этом образуют ковалентные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон в этих условиях оказывается настолько слабо связанным с атомом мышьяка, что может быть легко отщеплен даже при обычных температурах. Следовательно, примесь мышьяка в кристалл германия приводит к образова-

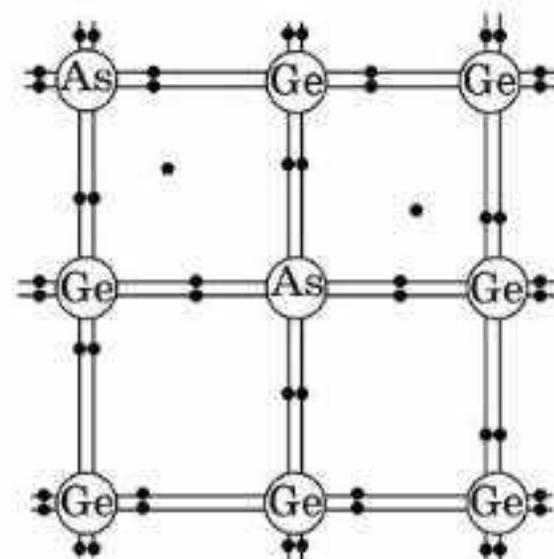


Рис. 65.5

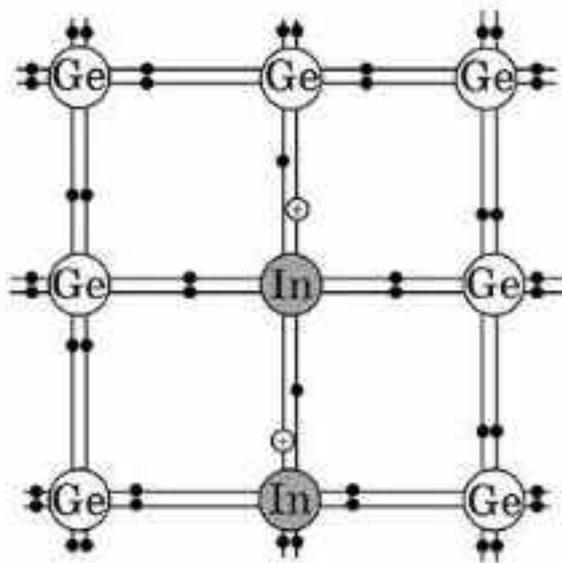


Рис. 65.6

нию электрона проводимости. Проводимость такого кристалла будет преимущественно электронной. Ее называют *проводимостью n -типа* (от *negative* — “отрицательный”), а сам кристалл — *полупроводником n -типа*. *Примесь, создающую в полупроводнике свободные электроны, называют донорной, или примесью n -типа*.

Если в чистый германий добавить атомы элементов III группы таблицы Менделеева, например, индия, у которых имеется по три валентных электрона, то этих электронов хва-

тит для установления ковалентной связи лишь с тремя соседними атомами германия. Для установления связи с четвертым атомом германия атом индия заимствует электрон у одного из соседних атомов германия (рис. 65.6). При этом в соответствующем месте образуется дырка, которая может участвовать в переносе тока. У кристаллов германия с примесью атомов элементов III группы проводимость преимущественно дырочная. Ее называют *проводимостью p -типа* (от *positive* — “положительный”). *Примесь, создающую проводимость p -типа, называют акцепторной (принимающей), или примесью p -типа*.

Электронно-дырочный переход. В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов. *Электронно-дырочный переход* (или $p - n$ -переход) — это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

В полупроводнике n -типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ($n_n \gg n_p$). В полупроводнике p -типа основными носителями являются дырки ($n_p \gg n_n$). При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области — в p -область. В результате в n -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок (рис. 65.7, а). Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (ее называют *запирающим слоем*) обычно достигает толщины порядка десятков или сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между p - и n -областями *запирающее напряжение*

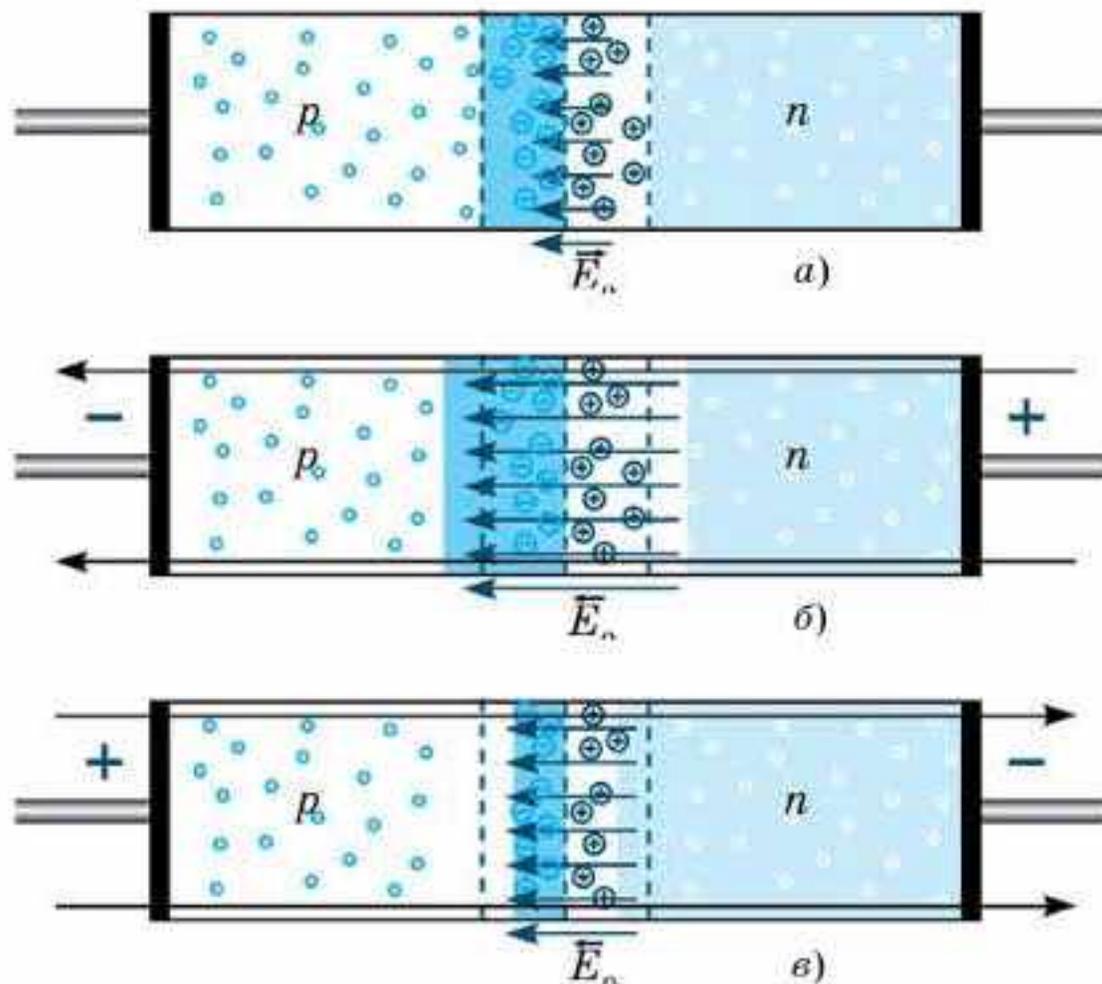


Рис. 65.7

U_0 , приблизительно равное 0,35 В для германиевых $n - p$ -переходов и 0,6 В — для кремниевых полупроводников. А $n - p$ -переход обладает свойством односторонней проводимости.

Если полупроводник с $n - p$ -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с n -областью, а отрицательный — с p -областью (рис. 65.7, б), то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от $n - p$ -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через $n - p$ -переход практически не идет. Напряжение, поданное на $n - p$ -переход, в этом случае называют *обратным*. Незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводника, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -области и дырок в n -области.

Если $n - p$ -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с p -областью, а отрицательный — с n -областью (рис. 65.7, в), то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать $n - p$ -переход, создавая ток в *прямом направлении*. Сила тока через $n - p$ -переход в этом случае при увеличении напряжения источника будет возрастать.

Полупроводниковый диод. Способность $n - p$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в *полупроводниковых диодах*. Их изготавливают из кристаллов кремния или германия. Для этого в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости. Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный. На рисунке 65.8 приведена типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода.

Полупроводниковые диоды обладают многими преимуществами по сравнению с вакуумными диодами: малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность. Существенным недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их параметров от температуры. Кремниевые диоды, например, могут удовлетворительно работать только в диапазоне температур от -70 до $+80^{\circ}\text{C}$. У германиевых диодов диапазон рабочих температур несколько шире.

Полупроводниковый транзистор. Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя $n - p$ -переходами называются *транзисторами* (от сочетания английских слов: *transfer* — “переносить” и *resistor* — “сопротивление”). Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний. Транзисторы бывают двух типов: $p - n - p$ -транзисторы и $n - p - n$ -транзисторы. Например, германиевый транзистор $p - n - p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с

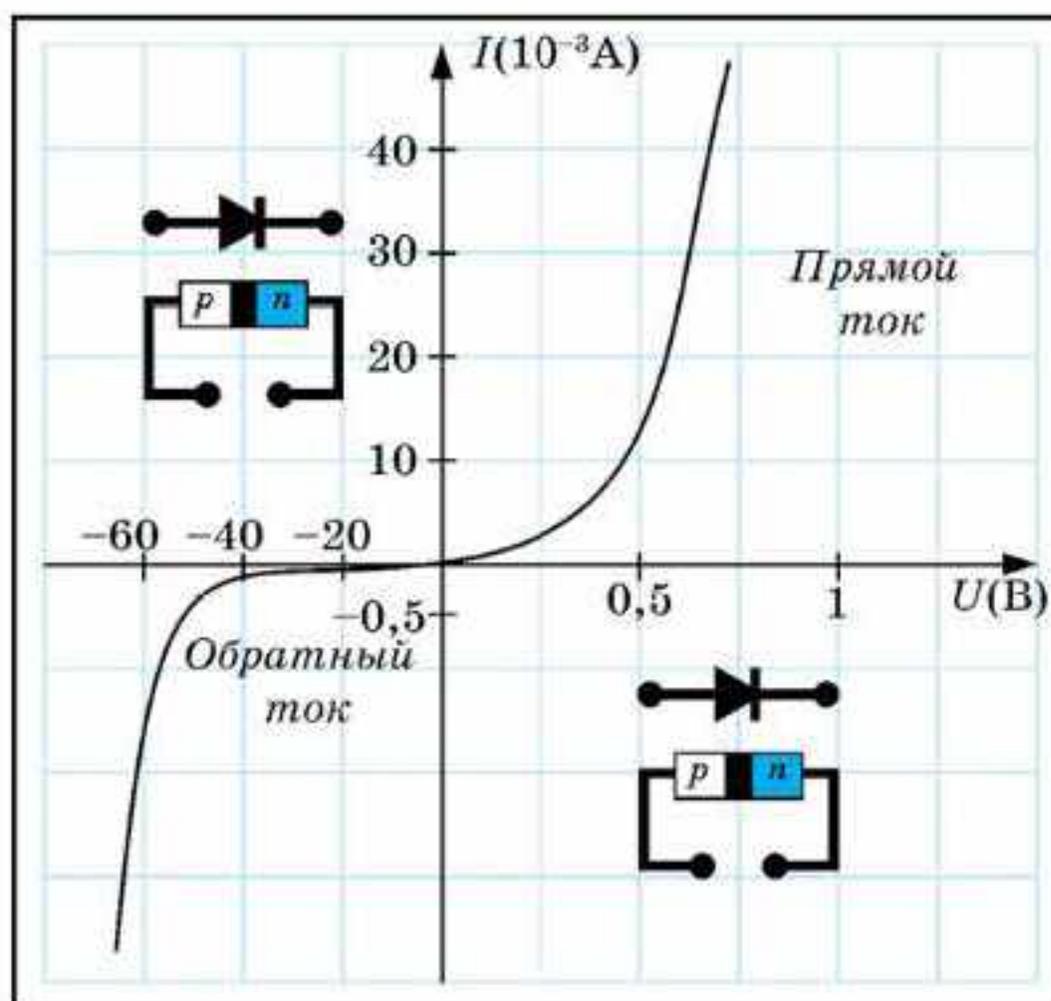


Рис. 65.8

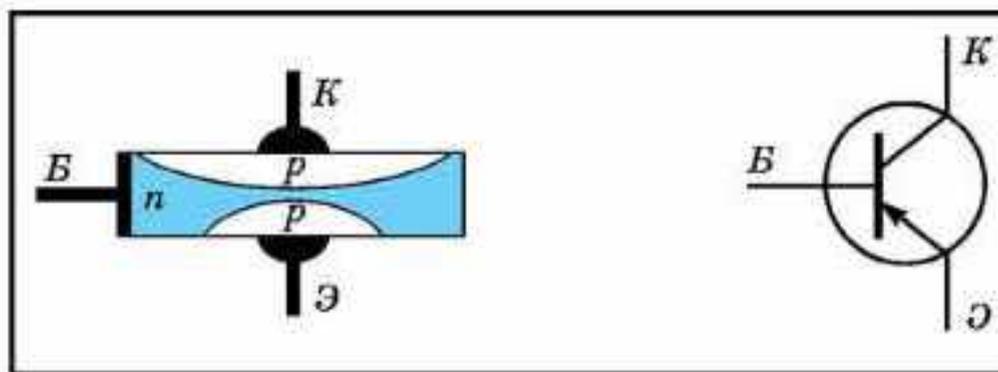


Рис. 65.9

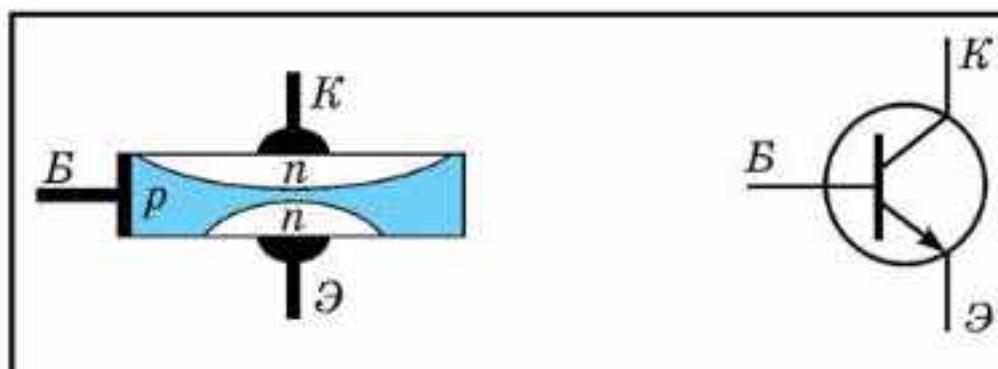


Рис. 65.10

донорной примесью, т. е. из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью (рис. 65.9). В транзисторе $n - p - n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области — проводимостью n -типа (рис. 65.10).

Пластинку транзистора называют *базой* (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости — *коллектором* (К), а вторую — *эмиттером* (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

Оба $n - p$ -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рисунке 65.11 показано включение в цепь транзистора $p - n - p$ -структуры. Переход “эмиттер — база” включается в прямом (пропускном) направлении (*цепь эмиттера*), а переход “коллектор — база” — в запирающем направлении (*цепь коллектора*). Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда — электронов в базе и дырок в коллекторе — переход заперт. При замыкании цепи эмиттера дырки, которые являются основными носителями заряда в эмиттере, переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток $I_{\text{э}}$. Но для дырок, попавших в базу из эмиттера,

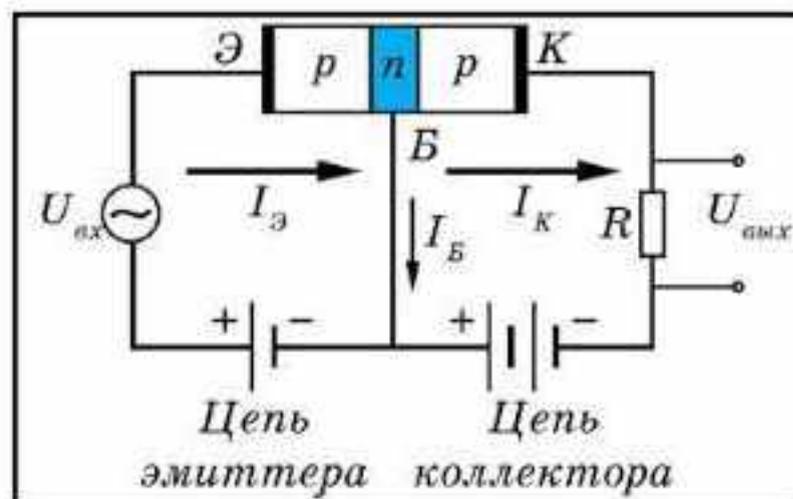


Рис. 65.11

$n - p$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок “захватывается” полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток I_K . Чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Если в цепь эмиттера включить источник переменного напряжения (рис. 65.10), то на резисторе R , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Это означает, что транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.

Применение полупроводниковых приборов. В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы — диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. — размером в несколько микрометров. Новым этапом электронной техники явилось развитие *микроэлектроники*, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Интегральной микросхемой называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов — сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером 1 см может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов. Благодаря этому произошли огромные изменения во многих областях современной электронно-вычислительной техники, космической связи и др.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества относятся к классу полупроводников?
2. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
3. Какие устройства называются *термисторами*? Где их применяют?
4. Что происходит в полупроводнике при его нагревании?
5. Что называется в проводниках *дыркой*?
6. Какая проводимость называется *собственной*?
7. Какая проводимость называется *донорной*?
8. Какие примеси называются *акцепторными*?
9. Какая проводимость называется *примесной*?
10. Как устроен и работает полупроводниковый диод? Где он применяется?
11. Какой ток называют *прямым*, а какой — *обратным*?
12. Как выглядит вольт-амперная характеристика полупроводникового диода?
13. Как устроен и работает *полупроводниковый диод*? Где он применяется?
14. Как устроен и работает *транзистор*? Где он применяется?



Творческая мастерская

Объясните

1. При каких условиях полупроводник может стать диэлектриком?
2. Почему сопротивление полупроводника, лишенного примесей, при нагревании уменьшается?

Творите

Вам предоставили два образца. Какой опыт вы предложили бы для того, чтобы определить, который из них металл, а который — полупроводник?

Анализируйте

1. Чем объясняется наличие небольшого обратного тока через $p-n$ -переход?
2. Известно, что энергия, необходимая для перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, у атомов металлов существенно меньше, чем у атомов полупроводников. Почему же тогда сопротивление полупроводников уменьшается при их освещении, а металлов — нет?
3. Четырехвалентный кремний с примесью пентавалентного мышьяка приобретает преимущественно электронную проводимость. В чем различие между полупроводником с электронной проводимостью и металлом?

Рефлексия

1. Выбери утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял; могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущал себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.

§ 66. Электрический ток в жидкостях



Ключевые понятия: электролитическая диссоциация; электролит; анион; катион; электролиз; первый и второй законы Фарадея для электролиза; электрохимический эквивалент вещества; химический эквивалент вещества; гальваностегия.

На этом уроке вы узнаете, как происходит электролитическая диссоциация; узнаете, что называют электролитом; изучите законы Фарадея для электролиза; научитесь применять законы электролиза при решении задач.

Электролитическая диссоциация. Рассмотрим прохождение электрического тока через растворы кислот, солей и щелочей. Чистая дистиллированная вода практически диэлектрик. Это можно доказать с помощью следующего опыта: если последовательно соединить с лампой накаливания ванну с дистиллированной водой, в которую опущены металлические пластины, и подключить лампу и ванну к сети, то лампа гореть не будет. Оказывается, раствор сахара в воде тоже не проводит тока. Если же с помощью пипетки ввести в ванну с водой несколько капель кислоты, то лампа ярко загорается. Значит, раствор кислоты в воде — хороший проводник тока. Рассмотрим причины этих явлений.

Молекулы воды являются природными диполями. Допустим, что в воде находится молекула соляной кислоты HCl . Она состоит из иона H^+ и иона Cl^- , которые удерживаются кулоновской силой притяжения. Вода сильно ослабляет электрическое взаимодействие зарядов (примерно в 80 раз), и хаотически движущиеся молекулы воды ударяют со всех сторон молекулу соляной кислоты; в результате этого молекула HCl распадается на ионы. Диполи воды окружают молекулу кислоты и как бы “растаскивают” ее на ионы (рис. 66.1). Находящиеся в воде разноименно заряженные ионы притягиваются и при встрече могут снова образовать молекулу. Поэтому, когда кислота попадает в воду, происходит не только процесс распада молекул на ионы, но и обратный процесс образования нейтральных молекул из ионов:

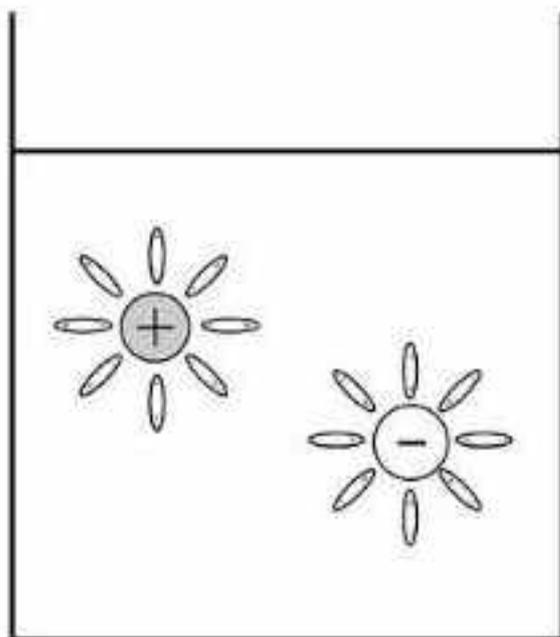


Рис. 66.1

Поэтому, когда кислота попадает в воду, происходит не только процесс распада молекул на ионы, но и обратный процесс образования нейтральных молекул из ионов:



(Стрелки показывают, что процесс протекает в обоих направлениях.)

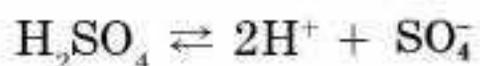
Распад молекул на ионы под действием растворителя называют **электролитической диссоциацией**. Число, показывающее, какую часть всех молекул растворенного

вещества составляют молекулы, распавшиеся на ионы, называется *степенью диссоциации*.

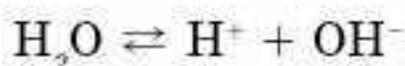
Процесс воссоединения ионов в нейтральную молекулу называется рекомбинацией.

Итак, подвижными носителями зарядов в растворах являются только ионы. При диссоциации ионы водорода и всех металлов оказываются заряженными положительно. Ионы в растворе часто представляют собой группу из нескольких атомов. Диссоциацию молекул на ионы может вызвать не только растворитель. Например, при сильном нагревании вещества его молекулы, состоящие из ионов, могут диссоциировать на отдельные ионы. Поэтому расплавы солей являются проводниками электрического тока.

Электролиз. Выясним подробнее, как проходит ток через раствор, в котором имеются подвижные ионы. *Жидкий проводник, в котором подвижными носителями зарядов являются только ионы, называют электролитом.* Пусть в ванну налит раствор серной кислоты. Диссоциация молекул серной кислоты происходит в соответствии с уравнением:



Опустим в ванну платиновые пластины и соединим их через амперметр с батареей. Эти пластины называются *электродами*. Электрод, соединенный с положительным полюсом батареи, называют *анодом*, электрод, соединенный с отрицательным полюсом, — *катодом*. Если замкнуть цепь ключом, то в электролите между электродами возникает электрическое поле. Под действием сил этого поля ионы водорода H^+ устремятся к катоду, а ионы кислотного остатка — к аноду. Дойдя до катода, ионы H^+ присоединяют к себе один из свободных электронов платины и превращаются в нейтральные атомы водорода. Соединяясь попарно, эти атомы образуют молекулы газообразного водорода, который и выделится на катоде. В описанном случае, кроме ионов SO_4^- , в электролите имеются и другие отрицательные ионы, так как молекулы воды в небольшом количестве тоже диссоциируют:

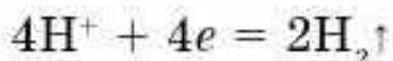


Ионы OH^- (гидроксил) легко отдают свой лишний электрон, а ионы SO_4^- удерживают свои электроны более прочно. Поэтому на аноде, куда подходят отрицательные ионы, разряжаются ионы OH^- , а ионы SO_4^- остаются в растворе. При разряде ионов OH^- образуется вода, а нейтральные молекулы газообразного кислорода выделяются на аноде. Обозначая абсолютную величину заряда электрона буквой e , все эти процессы можно записать следующим образом.

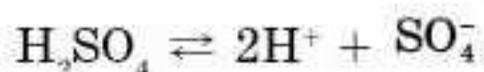
Образование ионов в растворе:



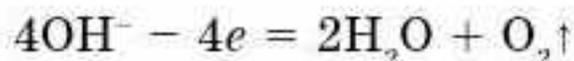
Процессы на катоде



Выделяется газообразный
водород



Процессы на аноде



Выделяется газообразный
кислород

Итак, из раствора уходят составные части молекул воды, а составные части кислоты остаются в растворе. Это означает, что по мере прохождения тока количество воды в растворе убывает, а концентрация раствора возрастает. Вот почему описанный процесс иногда называют *разложением воды электрическим током*.

Из описанного выше видно, что прохождение электрического тока через электролиты сопровождается превращением вещества, т. е. ток в электролитах производит химическое действие. *При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяется вещество из-за окислительно-восстановительных реакций. Это явление называется электролизом. Сосуд с электродами, в котором находится электролит, называют электролитической ванной. Положительные ионы в растворе называют катионами (так как они при электролизе идут к катоду), а отрицательные ионы называют анионами. Катионами являются ионы водорода и металлов.*

В приведенном выше примере вещество выделяется на обоих электродах. Это не всегда бывает так. Выделение вещества на обоих электродах происходит при *неактивном аноде*, который не растворяется в электролите. В технике для такого электролиза чаще пользуются угольными или графитовыми электродами.

Ток в электролите подчиняется закону Ома, т. е. изменяется прямо пропорционально напряжению. При нагревании электролитов уменьшается их вязкость, и в них возрастает подвижность ионов. Кроме того, при нагревании электролита возрастает степень диссоциации молекул растворенного вещества, т. е. увеличивается количество носителей тока в электролите. Это означает, что сопротивление электролитов при нагревании уменьшается.

Количество вещества, выделяющегося при электролизе. Первый закон Фарадея. Явление электролиза было изучено М. Фарадеем. Измеряя пропущенный через раствор заряд и массу катода до и после электролиза, Фарадей установил, что *масса вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, протекшего через раствор:*

$$m = kq. \quad (66.1)$$

Формула (66.1) является *математическим выражением первого закона Фарадея*.

Опыты Фарадея показали, что масса выделенного при электролизе вещества зависит не только от величины заряда q , но и от рода вещества. Коэффициент пропорциональности k , выражающий зависимость массы выделенного при электролизе вещества от его рода, называется **электрохимическим эквивалентом вещества**. *Электрохимический эквивалент — это физическая величина, характеризующаяся массой вещества, выделяющегося на электроде при прохождении через электролит единичного заряда:*

$$k = \frac{m}{q}.$$

В СИ единицей электрохимического эквивалента k является **1 кг/Кл**. Поскольку $q = It$, то **первый закон Фарадея** можно записать следующим образом:

$$m = kIt. \quad (66.2)$$

Опыты позволяют определить электрохимические эквиваленты с большой точностью. В свое время это позволило использовать формулу (66.2) для определения величины заряда 1 Кл по электрохимическому эквиваленту серебра, который был измерен особенно тщательно и оказался равным $1,118 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл = 1,118 мг/Кл.

Второй закон Фарадея. Определение заряда иона. Вспомним, что *масса одного моля ионов (в граммах) равна относительной молекулярной массе одного иона:*

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

Частное от деления молярной массы ионов на их валентность (M/n) называют химическим эквивалентом этих ионов. Так, относительная атомная масса меди 63,54, а валентность ее ионов равна 2. Тогда молярная масса меди равна 63,54 г/моль, а ее химический эквивалент равен $63,54/2$ г/моль = 31,77 г/моль = $31,77 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

В результате своих опытов Фарадей нашел, что для выделения на электроде одного химического эквивалента ионов любого вида нужно пропустить через электролит одинаковый заряд. Этот заряд принято называть **постоянной Фарадея** и обозначать символом F :

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

Следовательно, *общий заряд всех ионов, составляющих один химический эквивалент, равен F .*

Если при электролизе на электроде выделилось вещество массой m , а химический эквивалент составляет $\frac{M}{n}$, то отношение массы m вещества, выделившегося на электроде, к химическому эквиваленту вещества $\frac{M}{n}$, выражает число выделенных химических эквивалентов. Если при этом через раствор прошел заряд q , то отношение этого за-

ряда q к числу Фарадея F тоже есть число химических эквивалентов, выделенных при электролизе. Таким образом, $\frac{m}{\left(\frac{M}{n}\right)} = \frac{q}{F}$, откуда

$$m = \left(\frac{M}{nF}\right)q. \quad (66.3)$$

Сравнивая формулу (66.1) и (66.3), получим:

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n}. \quad (66.4)$$

Формула (66.4) является математическим выражением **второго закона Фарадея: электрохимические эквиваленты различных веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.** Заметим, что формула (66.4) выражает **объединенный закон Фарадея для электролиза.**

Выясним теперь, как можно найти заряд одновалентного иона, т. е. заряд электрона e , с помощью законов Фарадея. Если валентность ионов равна единице ($n = 1$), то химический эквивалент $\frac{M}{n}$ равен молярной массе ионов M , а заряд каждого иона численно равен e .

Вспомним, что число ионов в одном моле равно постоянной Авогадро N_A . Поэтому, если общий заряд всех ионов моля равен F , то

$$e = \frac{F}{N_A}. \quad (66.5)$$

Подставляя в (66.5) числовые значения F и N_A , находим **заряд одновалентного иона, или заряд электрона:**

$$e = \frac{9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ ион/моль}} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл/ион.}$$

Это значение заряда электрона совпадает с результатами опытов американского физика Р. Милликена (1868—1953), что подтверждает электронную теорию строения вещества и теорию электролитической диссоциации.

Использование электролиза в технике. Электролиз широко применяется в технике. Его используют для очистки от посторонних примесей металлов, полученных при выплавке из руды. С помощью электролиза из расплавленной руды извлекают легкие металлы, которые реагируют с водой и из растворов в воде не выделяются. Таким способом получают алюминий, натрий, литий и т. д. Цинк и никель получают *электрострикцией*, т. е. извлекают металл из раствора с помощью электролиза. Атомарный кислород, выделяющийся при электролизе, является сильным окислителем и используется при изготовлении различных лекарств.

С помощью электролиза производят покрытие металлических элементов тонким слоем другого металла, не окисляющегося на воздухе, что предохраняет изделия из металла от коррозии. Такой способ обработки поверхности называется *гальваностегией*. Примерами ее являются *никелирование* и *хромирование*. Гальваностегию применяют для изготовления украшений, например, при серебрении и золочении.

Изделие, которое необходимо покрыть, например, никелем, тщательно очищают, полируют и обезжиривают, после чего его погружают в качестве катода в гальваническую ванну. Электролитом является раствор соли металла (никеля), которым будут покрывать изделие. Анодом служит пластина из того же металла. Для равномерного покрытия изделие помещают между двумя анодными пластинами. После покрытия изделие вынимают из ванны, сушат и полируют.

Гальванопластика применяется во многих отраслях промышленности, в частности, в полиграфии. Процесс гальванопластики был разработан в 1836 году русским ученым Б.С. Якоби, который известен своими работами в области электротехники.

Для получения копий с металлических предметов (монет, барельефов) делают слепки из воска. Для придания слепку электропроводности его покрывают графитовой пылью и погружают в ванну в качестве катода. Получив на нем слой металла нужной толщины, его вынимают из ванны и путем нагревания удаляют воск.



Вопросы для самоконтроля

1. Какое явление называется *электролитической диссоциацией*? Каков его механизм?
2. Что называют *степенью диссоциации*?
3. Какое явление называется *рекомбинацией*?
4. Почему проводимость жидкостей ионная?
5. Что называют *электролитом*?
6. Какое явление называется *электролизом*? Как оно происходит?
7. Сформулируйте первый закон электролиза Фарадея.
8. Какая величина называется *электрохимическим эквивалентом*? Каков ее физический смысл?
9. Сформулируйте второй закон электролиза Фарадея.
10. Какая величина называется *химическим эквивалентом*? Каков ее физический смысл?
11. Какая величина называется *постоянной Фарадея*? В чем ее физический смысл?
12. Приведите примеры использования электролиза в технике.

Творческая мастерская

Экспериментируйте

Проведите эксперимент с электролизом воды. Для этого в стакане с водой растворите небольшое количество поваренной соли. Изготовьте 2 электрода из графита (сердцевина простого карандаша). В качестве источника тока можно взять две последовательно соединенные между собой батарейки по 1,5 В. Соедините один электрод с плюсом, а второй с минусом источника тока. Пронаблюдайте процесс выделения газов на электродах.

Объясните

1. На примере водного раствора сульфата меди CuSO_4 объясните, как происходит процесс электролитической диссоциации.
2. Почему сопротивление электролита при повышении его температуры уменьшается?

Творите

Предложите способ экспериментального определения заряда электрона, использующего законы электролиза и постоянную Авогадро.

Анализируйте

1. При электролизе выделенные из раствора положительные ионы металлов переходят на катод. Каким образом пополняется количество ионов металлов в растворе?
2. Почему при прохождении тока в металлических проводниках отложения веществ на электродах, как это происходит в электролитах, не наблюдается?

Решайте

1. При силе тока 5 А за время 10 мин в электролитической ванне выделилось 1,02 г двухвалентного металла. Определите его относительную атомную массу.
(Ответ: 65,4)
2. Определите толщину слоя меди, выделившейся за время 5 ч при электролизе медного купороса, если плотность тока 80 А/м².
(Ответ: 54 мкм)
3. В электролитической ванне через раствор прошел заряд 193 нКл. При этом на катоде выделился металл количеством вещества 1 моль. Определите валентность металла.
(Ответ: 2)
4. При электролизе раствора серной кислоты за 50 мин выделилось 0,3 г водорода. Найдите мощность, расходуемую на нагревание электролита, если его сопротивление равно 0,4 Ом.
(Ответ: 33 Вт)

Рефлексия

1. Выбери утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял; могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущал себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.

§ 67. Электрический ток в газах



Ключевые понятия: ионизация газа; самостоятельный и несамо-стоятельный газовый разряды; ударная ионизация; вторичная электронная эмиссия; тлеющий разряд; дуговой разряд; искровой разряд; коронный разряд; плазма.

На этом уроке вы: узнаете, что такое *ионизация газа* и как она протекает; изучите вольт-амперную характеристику газового разряда; узнаете, что газовый разряд бывает *несамостоятельным* и *самостоятельным*; изучите механизм возникновения *самостоятельного газового разряда*; рассмотрите различные виды газового разряда; ознакомитесь с *новым состоянием вещества* — плазмой.

Ионизация газа. Ионная и электронная проводимость газа. Все газы в обычных условиях являются хорошими изоляторами, однако в ограниченном пространстве газы, в том числе воздух, можно сделать проводниками. Для этого нужно искусственно создать в них подвижные носители зарядов, т. е. ионизировать молекулы газа.

Установить это можно с помощью следующего опыта. Возьмем большой плоский конденсатор, раздвинем его пластины и присоединим их к источнику напряжения в несколько тысяч вольт. Чувствительный гальванометр покажет нам, что тока в цепи нет, хотя между пластинами имеется электрическое поле. Это означает, что в воздухе между пластинами свободных зарядов или совсем нет, или так мало, что гальванометр не реагирует на их перемещение. Дальше мы увидим, что правильным является второе утверждение.

Установим между пластинами горящую свечу или направим туда пучок рентгеновских лучей. При этом стрелка гальванометра отклонится, т. е. по цепи пойдет ток. Значит, в воздухе произошла *ионизация молекул (появились подвижные носители зарядов)*. Если убрать ионизатор, то ток быстро исчезает, так как воздух между пластинами опять становится изолятором. На основании опытов подобного рода было установлено, что *ионизаторами газа могут быть: высокая температура; излучения: рентгеновское, ультрафиолетовое, α -излучение и т. д.*

В газе наряду с ионизацией всегда протекает и обратный процесс — *рекомбинация ионов*, т. е. образование нейтральных молекул из ионов газа. При ионизации от молекулы газа отрывается один из валентных электронов. Часть таких электронов присоединяется к нейтральным молекулам газа, образуя отрицательные ионы, часть остается в свободном состоянии. Таким образом, *подвижными носителями заряда в ионизированном газе являются свободные электроны и ионы (как положительные, так и отрицательные)*. Поэтому *проводимость ионизированного газа оказывается частично ионной и частично электронной*.

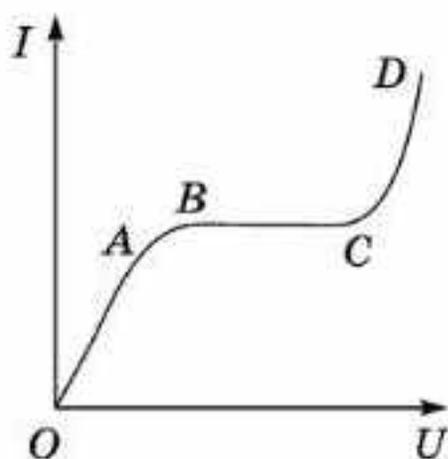


Рис. 67.1

Зависимость силы тока в газе от напряжения. Используя большое напряжение на пластинах конденсатора и измеряя гальванометром силу тока I , можно получить зависимость силы тока в газе от напряжения (т. е. вольт-амперную характеристику газового промежутка) при действии постоянного ионизатора (рис. 67.1). На этом графике видно, что *только при небольших напряжениях ток в газе подчиняется закону Ома*. Выясним, почему так происходит.

Когда напряжение между пластинами невелико, носители тока под действием электрического поля движутся медленно и в большинстве случаев успевают рекомбинировать, не дойдя до пластин. При увеличении напряжения растет скорость движения ионов под действием поля, а вероятность их рекомбинации уменьшается. Поэтому за единицу времени все больше ионов успевает дойти до пластин и нейтрализоваться на них, т. е. ток усиливается. Итак, на участке OA ток возрастает за счет ослабления рекомбинации подвижных носителей зарядов в газе (рис. 67.1).

Если напряжение на пластинах будет и далее повышаться, то наступит момент, когда рекомбинация носителей тока практически совсем прекратится, а сила тока достигнет наибольшего значения I_n , которое от напряжения уже не зависит (участок BC на рис. 67.1). Действительно, при отсутствии рекомбинации до пластин доходят все подвижные носители зарядов, которые успевает создавать ионизатор. Поэтому увеличение напряжения больше уже не может усиливать ток. Для увеличения силы тока в этом случае нужно увеличивать интенсивность ионизатора. Такой ток в газе, значение которого не зависит от напряжения, называют *током насыщения*.

Ионы газа, разряжающиеся на обкладках, снова превращаются в нейтральные молекулы того газа, из которого они образовались. Это означает, что *химического действия ток в газе не создает и законы Фарадея к нему не применимы*.

При достаточно высоком напряжении, когда напряженность поля между пластинами достигает десятков тысяч вольт на сантиметр, свободные электроны, двигаясь под действием сил поля, приобретают столь большую кинетическую энергию, что при столкновениях с молекулами газа отрывают от них электроны, т. е. ионизируют молекулы. Такое явление называется *ударной ионизацией*. В результате ударной ионизации количество носителей тока в газовом промежутке между электродами увеличивается, и ток быстро возрастает (участок CD на рис. 67.1).

Электрический разряд в газе при атмосферном давлении. Разряд в газе, который происходит только под действием постороннего ионизатора, называют *несамостоятельным*. Этот разряд еще называют *тихим* (он обнаруживается только с помощью измерительных приборов). Разряд в газе, который может происходить без воздействия постороннего ионизатора, называют *самостоятельным*.

Итак, носителями тока в газе являются свободные электроны и ионы. Между тем при прохождении тока через газ ионы разряжаются у электродов, превращаясь в нейтральные молекулы и атомы, а электроны поглощаются положительным электродом. Кроме того, еще часть носителей тока исчезает при рекомбинации. Следовательно, для поддержания тока в газе необходимо каким-то образом восполнять непрерывную убыль носителей тока. При самостоятельном разряде, как мы уже знаем, это делает сторонний ионизатор. При самостоятельном разряде эту роль выполняет сам ток.

Существует несколько механизмов образования новых носителей тока в газе. Один из них — *ударная ионизация*. Рассмотрим более подробно, в каком случае она возникает. Для удаления электрона с зарядом e из точки поля с потенциалом ϕ за пределы поля надо выполнить работу $A = \phi e$ против сил этого поля. Следовательно, чтобы ионизировать молекулу газа, нужно выполнить некоторую работу $A_{и}$, которую можно выразить соотношением:

$$A_{и} = \phi_{и} e. \quad (67.1)$$

Потенциал $\phi_{и}$ называют *потенциалом ионизации атома* или *молекулы*. Его величина зависит от рода атомов и молекул. Чтобы свободный электрон при столкновении с молекулой газа мог ее ионизировать, кинетическая энергия электрона $W_{к}$ перед его ударом о молекулу должна быть больше или равна работе ионизации $A_{и}$, т. е.

$$W_{к} \geq A_{и}. \quad (67.2)$$

Эту энергию электрон должен приобрести под действием сил внешнего электрического поля в газе на пути свободного пробега λ , так как после каждого столкновения с молекулой электрон теряет свое направленное движение вдоль поля и начинает новый разбег. Действующая на электрон сила равна eE (где E — напряженность поля), а путь электрона равен λ , поэтому

$$A_{и} = eE\lambda, \text{ или } \frac{mv^2}{2} = eE\lambda, \quad (67.3)$$

где λ — длина свободного пробега электрона; m — масса электрона; v — его скорость перед ударом о молекулу.

Поскольку длина свободного пробега электрона при атмосферном давлении мала, то для возникновения ударной ионизации поле в газе должно иметь большую напряженность E . Поэтому ударная ионизация при атмосферном давлении наступает лишь при достаточно высоком напряжении. Если постепенно увеличивать напряжение на электродах, то при некотором его значении напряженность поля станет достаточной для возникновения ударной ионизации. Число столкновений, приводящих к ударной ионизации, вначале невелико, но с увеличением напряжения растет.

Вторичные электроны, образующиеся при ударной ионизации, ускоряются полем и тоже принимают в ней участие. Наконец, при определенном напряжении на электродах каждый электрон, прежде чем исчезнуть, вызовет ионизацию хотя бы одной (в среднем) молекулы газа и образует хотя бы один свободный электрон. Тогда разряд в газе не только сможет поддерживать себя самостоятельно, но процесс ударной ионизации может принять лавинный характер. В этом случае лавинное нарастание носителей приведет к быстрому возрастанию тока и возникновению *электрического пробоя газа*. Для начала такого самостоятельного разряда достаточно нескольких свободных электронов, которые всегда есть в газе. Заметим, что ионы при столкновении с молекулами газа тоже могут вызывать ударную ионизацию.

Рассмотрим другие механизмы образования носителей тока при самостоятельном разряде.

При высокой температуре отрицательного электрода происходит термоэлектронная эмиссия, создающая значительное число свободных электронов в газе. Далее положительно заряженные ионы газа притягиваются к отрицательному электроду, и если их кинетическая энергия достаточно велика, то при ударе об электрод они могут выбивать из него электроны. Это явление называют *вторичной электронной эмиссией*.

При холодном катоде и нормальном давлении вторичная эмиссия в газе возникает только при высоком напряжении. Если же катод накалиен, то самостоятельный разряд будет происходить и при небольшом напряжении на электродах. Примером такого разряда является *электрическая дуга*, открытая в 1802 г. русским физиком В. В. Петровым (1761—1834). Дуговой разряд в газе происходит при раскаленном катоде или при высоком напряжении между электродами. Электрическая дуга широко используется в технике: в дуговых электропечах, при электролизе для получения алюминия, для электросварки, в качестве мощного источника света в прожекторах и т. д. Закон Ома к дуговому разряду не применим.

Искровым называют разряд газа, происходящий при высоком напряжении, достаточном для образования лавинного пробоя. Большая

сила тока в момент образования искры снижает напряжение на электродах, и разряд прекращается. Через некоторое время напряжение на электродах поднимается, и разряд вновь возобновляется. Эти разряды следуют друг за другом очень быстро и для газа сливаются в одну искру, которая имеет вид зигзагообразных светящихся линий, соединяющих электроды. При большой мощности источника тока искровой разряд может перейти в дуговой.

Искра представляет собой тонкий ветвистый шнур сильно ионизированного газа. Благодаря высокой электрической проводимости этого шнура через него проходит очень большой ток. Газ в шнуре разогревается до очень высоких температур и ярко светится. Резкое повышение давления, вызванного разогревом газа, создает звуковой эффект. Примером грандиозного искрового разряда в природе является *молния*. Напряжение между землей и тучей во время грозы достигает нескольких сотен вольт, а сила тока в молнии превышает 100 000 А. Извилистый вид молнии объясняется тем, что разряд проходит через участки воздуха с наименьшим сопротивлением, а они расположены в газе случайным образом.

Коронный разряд происходит в газе, когда ударная ионизация возникает не во всем пространстве, занятом полем, а лишь вблизи электродов или проводов, где напряженность поля наиболее высокая. Лавины затухают, достигая областей с более низкой напряженностью. Этот разряд протекает при напряжении, несколько меньшем того, которое необходимо для возникновения искры. Он возникает около проводов, находящихся под высоким напряжением. Коронный разряд сопровождается слабым свечением и характерным треском. При этом ионы, находящиеся в воздухе вблизи провода, разряжаются на нем, вызывая утечку энергии, передаваемой по проводам. Поэтому “корона” на проводах высоковольтных передач — явление вредное. Полезное применение коронный разряд находит в *электрофильтрах* для очистки топочных газов, загрязняющих воздух мельчайшими частицами золы, и т. д.

Электрический разряд в разреженных газах. Из сравнения формул (67.2) и (67.3) видно, что при самостоятельной проводимости газа должно выполняться соотношение:

$$eE\lambda \geq A_{и}, \quad (67.4)$$

т. е. при увеличении длины свободного пробега электронов можно получить самостоятельную проводимость газа при меньшей напряженности поля E , т. е. при более низком напряжении. Таким образом, при разрежении газа его проводимость должна возрастать. Этот вывод подтверждается следующим опытом.

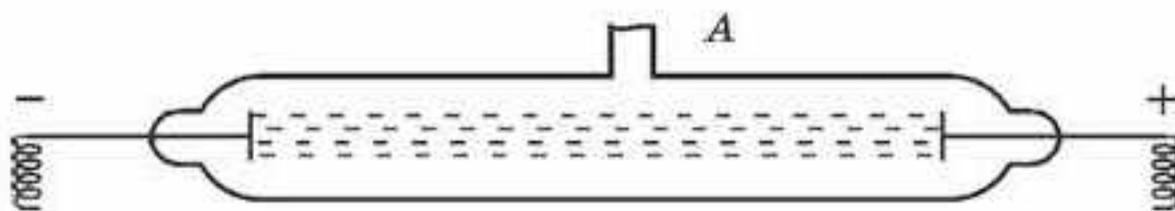


Рис. 67.2

Берут стеклянную трубку с двумя впаянными электродами и отверстием *A* для откачивания воздуха (рис. 67.2). Затем электроды присоединяют к источнику напряжения в несколько тысяч вольт. Если теперь через отверстие *A* откачивать из трубки воздух насосом, то при достаточно маленьком давлении воздух в трубке начинает светиться. Это означает, что в воздухе возник самостоятельный разряд. Свободные электроны в трубке появляются вследствие вторичной эмиссии на катоде, о поверхность которого ударяются ионы.

Характер свечения воздуха меняется в зависимости от степени разрежения. Сначала между электродами появляются лиловые шнуры, а затем начинает светиться розоватым светом весь воздух в трубке. Заполняя трубку различными газами и пропуская через них ток, можно увидеть, что каждый газ (разреженный) имеет свой собственный цвет свечения. Например, аргон светится синим светом, неон — красным и т. д. *Разряд в разреженном газе, сопровождающийся свечением, называют тлеющим.* Тлеющий разряд испускает не очень яркое свечение. Выделение тепловой энергии в газовом промежутке при тлеющем разряде невелико, и светящийся газ остается холодным. Тлеющий разряд используется в *газосветных трубках*, которые широко применяются в световых рекламах.

Плазма. Ионизированный газ является проводником, хотя в целом он электрически нейтрален, так как содержит равные количества положительных и отрицательных зарядов, являющихся носителями тока. *Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована, называют плазмой.* По-другому можно сказать: *плазмой называют вещество в таком состоянии, когда оно в целом электрически нейтрально, но содержит равные количества свободных положительных и отрицательных зарядов.* Если в плазме встречаются нейтральные атомы или молекулы, то ее называют *частично ионизированной*. Когда же все молекулы или атомы вещества ионизированы, то плазму называют *полностью ионизированной*.

При температуре 20 000—30 000 К любое вещество представляет собой полностью ионизированную плазму. Это — наиболее распространенное состояние вещества в природе. Солнце и другие звезды, в которых сосредоточено почти все вещество Вселенной, представляют собой гигантские сгустки высокотемпературной плазмы. Из частично ионизированной плазмы состоят верхние слои атмосферы — *ионосфера*.

Такого рода плазма, но в очень сильно разреженном состоянии, рассеяна и в космическом пространстве. Примером частично ионизированной плазмы является также газ, через который проходит электрический ток.

Классическая плазма — это ионно-электронный газ, разбавленный нейтральными частицами. Если степень ионизации не слишком мала, этот газ демонстрирует множество специфических качеств, которыми не обладают обычные газы.

В электронно-ионной плазме частицы притягиваются или отталкиваются в соответствии с законом Кулона, причем это взаимодействие проявляется на больших расстояниях. Именно этим они отличаются от атомов и молекул нейтрального газа, которые чувствуют друг друга лишь на очень малых дистанциях. Частицы в плазме легко смещаются под действием электрических сил. Поэтому в равновесной плазме плотности частиц разных знаков практически одинаковы. Это важнейшее свойство называется *квазинейтральностью*. Поэтому под плазмой понимают квазинейтральную систему большого числа разноименных заряженных частиц, демонстрирующих коллективное поведение. Частицы плазмы чувствуют сколь угодно слабые электрические и магнитные поля и немедленно приходят в движение, порождая объемные заряды и электрические токи.



Вопросы для самоконтроля

1. Как объяснить механизм ионизации газов, производимой следующими ионизаторами газа: а) нагреванием до высокой температуры; б) с помощью рентгеновских лучей; в) с помощью ультрафиолетовых лучей; г) с помощью α -лучей?
2. Какой процесс называют *рекомбинацией*? Почему в газе рекомбинация происходит быстро? (Рассмотрите состояние газа после окончания ионизации.)
3. Какое явление называется *электрическим пробоем газа*?
4. Что такое *ионизация газа*? Опишите, как она протекает.
5. Почему проводимость газов ионно-электронная?
6. Как выглядит вольт-амперная характеристика тока в газе? Объясните характер этой кривой.
7. Что называют *несамостоятельным разрядом*? Как он происходит?
8. Какой процесс называется *ударной ионизацией*, или *ионизацией электронным ударом*?
9. Что такое *потенциал ионизации*? Почему у разных газов он разный?
10. Что называют *самостоятельным разрядом*? Как он происходит?
11. В чем особенности протекания *дугового, коронного и искрового разряда*?
12. Что такое *плазма*?

Творческая мастерская

Наблюдайте

Во время каких природных явлений можно наблюдать газовый разряд? К каким выводам подводят ваши наблюдения?

Экспериментируйте

С помощью электрофорной машины зарядите большой демонстрационный конденсатор. Подсоединив обкладку конденсатора к электроскопу, убедитесь в наличии заряда на пластине. Внесите в пространство между пластинами горящую свечу. Пронаблюдайте за поведением стрелки электроскопа.

Объясните

1. Как объяснить механизм ионизации газов, производимый с помощью рентгеновских лучей?
2. Почему опоры высоковольтных линий электропередач делают высокими?
3. Изобразите на графике зависимость тока от напряжения в газе при неизменной интенсивности ионизатора. Объясните каждый участок графика.

Анализируйте

1. Укажите сходства и различия между ионизацией газов и диссоциацией электролитов.
2. Ионизация электронным ударом, при котором образуется электронная лавина, сама по себе не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Какие дополнительные процессы необходимы для перехода несамостоятельного газового разряда в самостоятельный?

Решайте

1. Какой наименьшей скоростью должен обладать электрон для того, чтобы ионизировать атом водорода? Потенциал ионизации атома водорода 13,5 В.
(Ответ: 2,2 Мм/с)
2. Какова сила тока насыщения при несамостоятельном газовом разряде, если ионизатор образует каждую секунду 10^9 пар ионов в 1 см^3 , площадь каждого из двух плоских параллельных электродов 100 см^2 и расстояние между ними 5 см?
(Ответ: 8 мкА)
3. При какой температуре атомы ртути имеют среднюю кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации? Потенциал ионизации атома ртути 10,4 В.
(Ответ: 80000 К)

Рефлексия

1. Выбери утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял; могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущал себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно

§ 68. Электрический ток в вакууме



Ключевые понятия: термоэлектронная эмиссия; электронное облако; двухэлектродная лампа; трехэлектродная лампа; электронно-лучевая трубка.

На этом уроке вы узнаете, как протекает процесс термоэлектронной эмиссии; изучите вольт-амперную характеристику вакуумного диода; рассмотрите принцип действия и применение некоторых вакуумных электронных приборов.

Полный вакуум является идеальным изолятором. Для того чтобы через пространство, в котором создан высокий вакуум, пошел ток, нужно искусственно ввести в данное пространство свободные электроны. Это можно сделать с помощью термоэлектронной эмиссии, помещая в вакуум металлическую проволоку, которую можно включить в электрическую цепь (рис. 68.1).

Когда для опыта берут пустотную лампу накаливания, то электроны с раскаленной нити вылетают в вакуум. Если между нитью накала K и электродом A создать электрическое поле, заставляющее электроны двигаться к электроду A , то цепь замыкается, и в вакууме течет ток. В этом случае свободные электроны движутся в вакууме беспрепятственно и за счет работы сил поля получают кинетическую энергию. Если напряжение между электродами (рис. 68.1) равно U , то работа сил поля по перемещению электрона между электродами K и A выражается формулой:

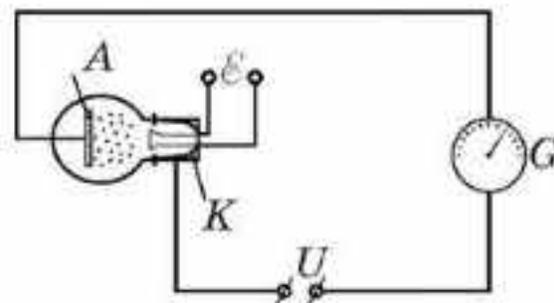


Рис. 68.1

$$A = Ue. \quad (68.1)$$

Поскольку за счет этой работы электроны приобретают кинетическую энергию, получаем:

$$W_{\kappa} = Ue \text{ или } \frac{mv^2}{2} = eU, \quad (68.2)$$

где m — масса; v — скорость электрона; e — заряд электрона.

Напряжение в этом случае называют *разгоняющим*. Масса электрона очень мала, поэтому движением электронов в вакууме можно легко управлять.

Двухэлектродная лампа (диод). На управлении движением свободных электронов в вакууме с помощью электрического поля основано устройство электронных ламп. Простейшую электронную лампу с двумя электродами называют *двухэлектродной лампой*, или *диодом*. Одним ее электродом является *вольфрамовая проволока*, концы которой выведены из лампы. Это позволяет накаливать проволоку током

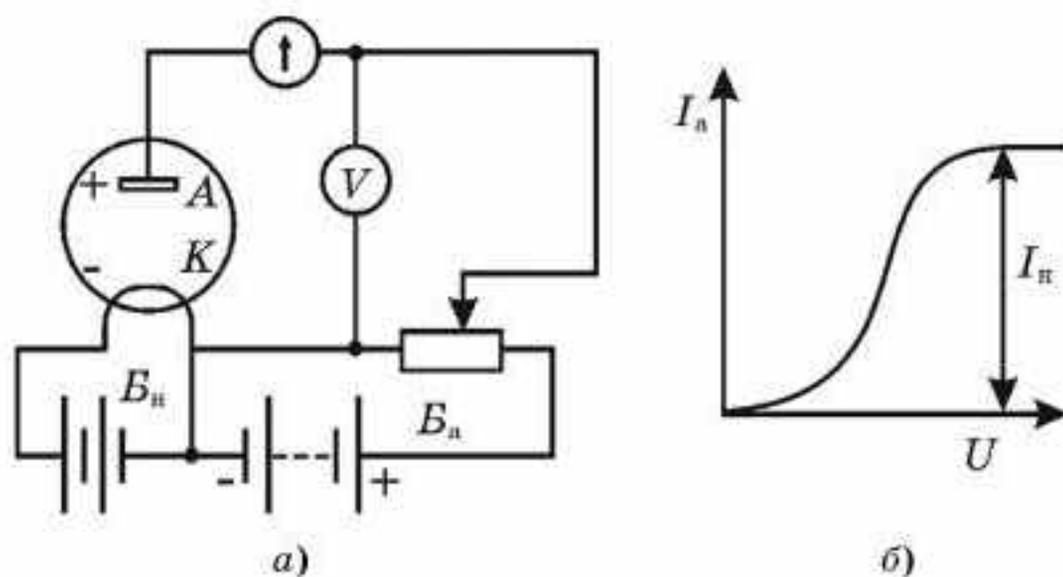


Рис. 68.2

от батареи накала B_n (рис. 68.2, а). Внутри лампы создается высокий вакуум. При накаливании проволочки K , которая служит катодом лампы, происходит термоэлектронная эмиссия, и в лампе появляются свободные электроны.

Второй электрод лампы A является анодом. Его можно соединять с катодом K через анодную батарею B_a . Анод имеет один вывод из лампы. Таким образом, диод имеет всего три вывода для включения в цепь. Когда анодная батарея отключена, а катод накален, то свободные электроны, находящиеся внутри лампы, держатся в непосредственной близости от катода и создают отрицательный пространственный заряд, который называют *электронным облаком*. При постоянной температуре накала катода у его поверхности существует подвижное равновесие между электронами, испаряющимися с катода и оседающими на нем. Это означает, что количество свободных электронов в пространстве между катодом и анодом лампы остается постоянным. Чтобы увеличить пространственный заряд между катодом и анодом, необходимо повысить температуру накала нити.

Включим теперь анодную батарею так, чтобы анод лампы был соединен с ее отрицательным полюсом, а катод — с положительным. Тогда электрическое поле внутри лампы будет смещать электроны к катоду, пространственный заряд в лампе несколько уменьшится, а тока в анодной цепи не будет. Это можно установить с помощью гальванометра.

Соединим с анодом лампы положительный полюс батареи B_a , а с катодом — ее отрицательный полюс B_n (рис. 68.2, а). В этом случае поле в лампе будет перемещать электроны по направлению к аноду, т. е. через лампу пойдет ток, и стрелка гальванометра отклонится.

Таким образом, *диод замечателен тем, что он пропускает ток только в одном направлении*. Этим обусловлено важнейшее применение диода в технике для выпрямления переменного тока. Вначале ток в лампе растет с ростом анодного напряжения, что объясняется расса-

сыванием электронного облака около катода и уменьшением оседания электронов из облака на катоде. При дальнейшем увеличении напряжения, когда электронное облако полностью рассосется, все вылетевшие из катода электроны будут попадать на анод, и сила тока в лампе перестанет расти, т. е. достигается ток насыщения $I_{\text{н}}$ (рис. 68.2, б). Он будет тем больше, чем выше температура накала катода. Из изложенного выше следует, что закон Ома к электронным лампам не применим.

Трехэлектродная лампа (триод). В электронной лампе удобно управлять током с помощью *дополнительного электрода, который помещают между катодом и анодом и называют сеткой*. Сетку располагают ближе к катоду, и поэтому даже при небольшом напряжении, подаваемом между сеткой и катодом, в зазоре между ними создается

мощное электрическое поле, оказывающее сильное влияние на анодный ток лампы. Обычно сетку изготавливают в виде проволочной спирали, навитой с небольшим зазором вокруг катода. Анод делают в форме сплошной цилиндрической поверхности, охватывающей сетку и катод. *Электронную лампу с сеткой называют трехэлектродной лампой, или триодом*. Обозначают триод на схеме так, как указано на рисунке 68.3.

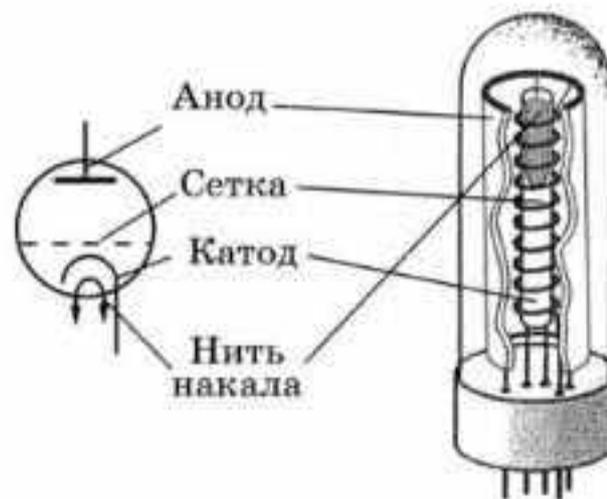


Рис. 68.3

Электронно-лучевая трубка. Для получения изображений на экране с помощью пучка электронов в осциллографах, телевизорах, радиолокационных установках и других электронных приборах используют *электронно-лучевую трубку*. Она представляет собой герметически закрытую стеклянную колбу с широким дном, из которой удален газ. В узкой части трубки расположена *электронная пушка*, которая создает *электронный луч*. Электронная пушка состоит из *подогреваемого катода и управляющего электрода, который действует подобно сетке в триоде* (рис. 68.4).



Рис. 68.4

При подогреве катода происходит термоэлектронная эмиссия. Электроны летят к аноду и по пути проходят через отверстие в управляющем электроде, который имеет форму полого цилиндра. Управляющий электрод позволяет регулировать число электронов, прилетающих к аноду, и помогает собирать их в узкий пучок, который и называют *электронным лучом*.

Анод представляет собой несколько дисков с отверстиями, которые помещаются в полый металлический цилиндр. Такое устройство анода помогает фокусировке электронного луча на дне колбы. Дно колбы является *экраном*. Между анодом и катодом трубки создается напряжение в несколько тысяч вольт. Поле между анодом и катодом разгоняет электроны до больших скоростей, поэтому, когда электроны, пролетев колбу, ударяются об экран, покрытый *люминофором*, последний начинает светиться — на экране возникает светлое пятнышко.

Управлять движением электронного луча в трубке можно с помощью дополнительного электрического поля, создаваемого *отклоняющими пластинами*. Для этого в трубку помещают две пары таких пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поле одной пары пластин отклоняет электронный луч в горизонтальном направлении, поле второй пары — в вертикальном направлении. Таким способом можно перемещать светлое пятнышко в любое место экрана электронно-лучевой трубки. Управлять электронным лучом можно и с помощью магнитных полей. Такое управление лучом используется в трубках телевизоров.



Вопросы для самоконтроля

1. Какой процесс называется *термоэмиссией*? Как он протекает?
2. Как увеличить эмиссию электронов с электрода?
3. Почему проводимость вакуума односторонняя?
4. Что называют *вакуумным диодом*? Как он устроен и как работает?
5. Что называют *вакуумным триодом*? Как он устроен и как работает?
6. Что называют *электронно-лучевой трубкой*? Опишите ее устройство и принцип действия.

Примеры решения задач

1. При электролизе раствора сульфата меди была совершена работа 4 кВт·ч. Определите количество выделившейся меди, если напряжение между электродами ванны равно 6 В.

Дано:

$$A = 4 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$U = 6 \text{ В}$$

$$k = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$$

$$m = ?$$

Решение. Согласно закону электролиза Фарадея, масса вещества, выделяющегося на электродах, пропорциональна заряду, прошедшему через электролит:

$$m = kq.$$

Работа по перемещению этого заряда равна: $A = qU$, отсюда $q = \frac{A}{U}$.

$$\text{Тогда } m = \frac{kA}{U}. \quad m = \frac{3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл} \cdot 4 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{6 \text{ В}} = 0,792 \text{ кг} = 792 \text{ г}.$$

(Ответ: $m = 792 \text{ г}$.)

2. По медному проводу сечением 1 мм² протекает ток силой 10 мА. Определите скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника. На каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

Дано:

$$S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$I = 10 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$M = 64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$v = ?$$

Решение. По определению, сила тока $I = \frac{q}{t} = \frac{e \cdot N}{t}$, где N — число электропроводимости.

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M} = \frac{N_A \cdot \rho \cdot V}{M} = \frac{N_A \cdot \rho \cdot S \cdot l}{M},$$

где l — длина провода. Тогда

$$I = \frac{e \cdot N_n \cdot \rho S \cdot l}{M \cdot t}.$$

Скорость упорядоченного движения электронов равна $v = \frac{l}{t}$. Тогда

$$I = \frac{e \cdot N_n \cdot \rho S v}{M}. \quad \text{Отсюда } v = \frac{IM}{e \cdot N_A \cdot \rho S}.$$

$$v = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м/с} = 0,75 \text{ мкм/с}.$$

(Ответ: $v = 0,75 \text{ мкм/с}$.)

3. Энергия ионизации воздуха 15 эВ. Определите среднюю длину свободного пробега электрона в воздухе. Напряженность пробоя $3 \cdot 10^6$ В/м.

Дано:

$$W_{\text{и}} = 15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$E = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\lambda \text{ — ?}$$

Решение. Для того чтобы ионизировать воздух, электрон под действием электрического поля должен пробежать расстояние λ (длина свободного пробега), достаточное для приобретения энергии $W_{\text{и}} = qU$. Напряжение U связано с напряженностью E электрического поля:

$$U = E\lambda.$$

Тогда $W_{\text{и}} = q \cdot E\lambda$. Так как $q = e$, то

$$\lambda = \frac{W_{\text{и}}}{eE} \cdot \lambda = \frac{15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^6} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5 \text{ мкм.}$$

(Ответ: $\lambda = 5$ мкм.)

4. Каков расход энергии на получение 10 кг алюминия, если электролиз ведется при напряжении 24 В, а КПД установки 80%?

Решение. Согласно определению $\eta = \frac{A_n}{A_s}$, где $A_n = IUt$ — работа тока, так как $It = q$, а согласно закону Фарадея $m = kq$, то $q = \frac{m}{k}$, здесь k — электрохимический эквивалент алюминия, $A_s = W$ — расход энергии. Тогда $\eta = \frac{mU}{k\eta}$; отсюда $W = \frac{mU}{k\eta} = \frac{10 \text{ кг} \cdot 24 \text{ В}}{9,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 0,8} \approx 3,2 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$

5. Получится ли сверхпроводящий кремний, если его охладить до температуры, близкой к 0 К?

Решение. Нет, так как с понижением температуры сопротивление полупроводников (а кремний полупроводник) возрастает (резко уменьшается число свободных носителей зарядов (электронов и дырок).

6. К концам цепи, состоящей из последовательно соединенных термистора и резистора сопротивлением 1 кОм, подано напряжение 20 В. При комнатной температуре сила тока в цепи равна 5 мА. Когда термистор опустили в горячую воду, сила тока стала равна 10 мА. Во сколько раз уменьшилось сопротивление термистора?

Решение. 1) До погружения в горячую воду имеем: $I_1 = \frac{U}{R_1 + R}$, отсюда $R_1 = \frac{U}{I_1} - R$;

2) После погружения в горячую воду $I_2 = \frac{U}{R_1 + R}$; отсюда $R_2 = \frac{U}{I_2} - R$

$$\text{тогда } \frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{U}{I_1} - R}{\frac{U}{I_2} - R} = 3.$$



Творческая мастерская

Объясните

1. Объясните особенности вольтамперной характеристики вакуумного диода. Почему диод обладает односторонней проводимостью?
2. Вакуум является идеальным изолятором. В таком случае, какие меры надо предпринять, чтобы через вакуумное пространство проходил ток?

Творите

Вакуумный диод обладает односторонней проводимостью. Предложите устройства, в которых можно было бы использовать это свойство диодов.

Анализируйте

Рассмотрите электронный пучок в электронно-лучевой трубке. Скорость электронов в пучке изменяется, так как они движутся ускоренно. Можно ли то же самое сказать о силе тока в пучке?

Решайте

1. Сколько электронов эмитирует из катода за 1 ч работы вакуумного диода при анодном токе насыщения, равном 20 мА?

(Ответ: $4,5 \cdot 10^{20}$)

■2. Электрон, вышедший из накаливаемого катода K электронно-лучевой трубки с достаточно малой скоростью, приобретает скорость в поле анода A , находящегося под потенциалом ϕ , и, пройдя между пластинами конденсатора длины l , попадает на флуоресцирующий экран, помещенный на расстоянии L от конденсатора. Когда в конденсаторе появляется электрическое поле, пятно на экране смещается на расстояние d . Чему равна напряженность поля E в конденсаторе?

$$\text{(Ответ: } E = \frac{2d\phi}{l\left(L + \frac{l}{2}\right)} \text{)}$$

Рефлексия

1. Выбери утверждение: все понял, могу помочь другим; все понял; могу, но нужна помощь; ничего не понял; интересный; хороший; отличный; запомню надолго; однообразный; неинтересный; скучный.
2. Ощущал себя: хорошо; уверенно; смело; гордо; комфортно; глупо; неуверенно; испуганно; сердито; грустно.

Различные вещества обладают различной *проводимостью*.

Электрическая проводимость металлов обусловлена наличием в них свободных электронов. Поэтому *проводимость металлов электронная*.

Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры и примесей. Поэтому появляется возможность легко управлять проводимостью полупроводников, что используется в полупроводниковых приборах (диодах, транзисторах, термисторах, фоторезисторах и т. д.). *Проводимость полупроводников электронно-дырочная*.

Электрический ток в вакууме возникает из-за явления *термоэлектронной эмиссии* — вылета электронов из нагретого металла. *Проводимость вакуума электронная и односторонняя*.

Водные растворы солей, щелочей или кислот (электролиты) в воде являются хорошими проводниками, так как в них из-за явления электролитической диссоциации появляются носители заряда — положительные и отрицательные ионы.

Прохождение тока через электролит сопровождается выделением вещества на электродах. Это явление называется *электролизом*. Закон электролиза установил М. Фарадей:

$$m = kIt,$$

где k — электрохимический эквивалент вещества:

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n},$$

где $F = 96\,500$ Кл/моль — постоянная Фарадея; M — молярная масса вещества; n — валентность.

Газы при температурах, близких к комнатным, состоят в основном из нейтральных атомов или молекул и являются *диэлектриками*. При нагревании или под действием излучения происходит ионизация газов, и в них появляются свободные носители заряда — положительные и отрицательные ионы и электроны. Газ становится *проводником*, и его *проводимость электронно-ионная*. Ток в газах называется *разрядом*. На практике широкое применение получили такие виды самостоятельного разряда, как *тлеющий, дуговой, искровой*.

Частично или полностью ионизированный газ называется плазмой. Электрические свойства плазмы позволяют использовать ее в различных областях техники.

Глава 13. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 69. Магнитное поле.

Взаимодействие параллельных токов



Ключевые понятия: магнитное поле, силовые линии магнитного поля, вектор магнитной индукции, правило обхвата правой рукой.

На этом уроке вы узнаете физический смысл вектора магнитной индукции.

После того, как Эрстед обнаружил, что электрический ток действует на стрелку компаса, ориентируя ее так, что она устанавливается перпендикулярно току (рис. 69.1), им была высказана гипотеза о том, что проводник с током изменяет свойства окружающего его пространства. Это измененное пространство становится посредником передачи действия тока на магнитную стрелку. По сути дела, вокруг проводника с током возникает особая среда, передающая магнитные взаимодействия. Эту среду Эрстед назвал *магнитным полем*.

Опыты А. М. Ампера, в которых было обнаружено взаимодействие параллельных токов, показали, что это взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля. Параллельные проводники, в которых токи протекают в одном направлении, притягиваются, а если токи текут в противоположных направлениях, то проводники отталкиваются друг от друга, причем сила взаимодействия токов зависит от расстояния между ними (рис. 69.2).

Затем было установлено, что, если поместить между полюсами магнита рамку, по которой течет ток, то она тоже устанавливается строго определенным образом (рис. 69.3). То есть, магнитное поле не только передает магнитные взаимодействия, но и оказывает **ориентирующее действие**.

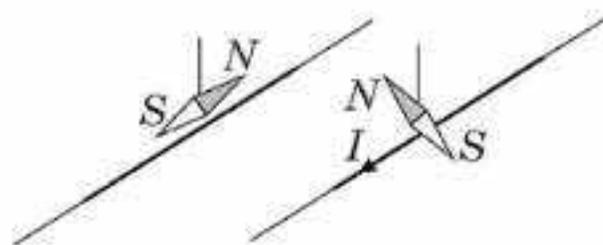


Рис. 69.1

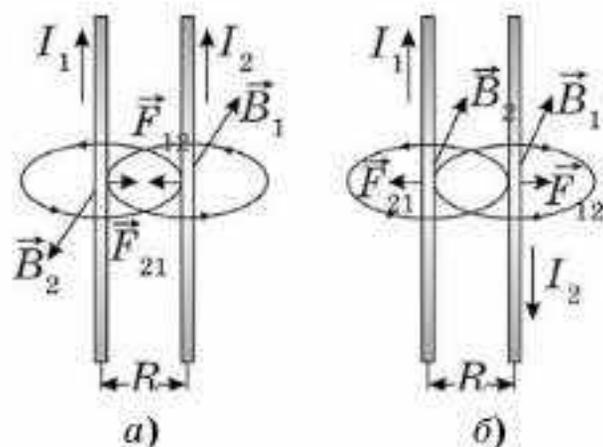


Рис. 69.2. Магнитное взаимодействие токов, идущих в одном (а) и противоположных (б) направлениях

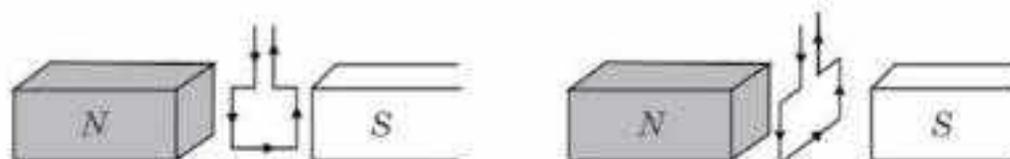


Рис. 69.3

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля. Источниками магнитного поля являются *движущиеся электрические заряды* (токи). Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества.

Магнитное поле токов принципиально отличается от электрического поля. Магнитное поле, в отличие от электрического поля, оказывает силовое действие только на движущиеся заряды (токи).

Магнитное поле — это особый вид материи, передающий магнитные взаимодействия. Оно существует независимо от нас и нашего сознания. Оно непрерывно в пространстве и его действие распространяется практически до бесконечности.

Точно также можно сказать, что вокруг массивных тел существует силовое поле, которое передает гравитационное взаимодействие. Его называют гравитационным полем. Вокруг заряженных тел существует другое силовое поле, передающее электрическое взаимодействие. Его называют электрическим полем. Каждая точка любого силового поля характеризуется особой физической величиной — *напряженностью* поля.

Так, например, под напряженностью электрического поля понимают физическую величину, показывающую, с какой силой электрическое поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{эл}}{q_0}. \quad (69.1)$$

Под напряженностью гравитационного поля понимают физическую величину, показывающую, с какой силой гравитационное поле действует на тело единичной массы, помещенное в данную точку поля.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{гр}}{m}. \quad (69.2)$$

Магнитное поле принято характеризовать другой силовой величиной — *вектором магнитной индукции* \vec{B} .

Под вектором магнитной индукции понимают особую физическую величину, определяемую максимальной силой, действующей со стороны магнитного поля на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток, расположенный перпендикулярно магнитному полю:

$$B = \frac{F}{Il}.$$

Единица измерения магнитной индукции в международной системе единиц СИ называется Тесла: $Tл = \frac{Н}{А \cdot м}$. Она названа в честь сербского ученого Н. Тесла (1856—1943).

Магнитное поле изображают графически с помощью силовых линий, вдоль которых располагаются мелкие железные опилки, которые в магнитном поле намагничиваются и подобны маленьким магнитным стрелкам (рис. 69.4, а, б, в, г, д).

Под силовыми линиями магнитного поля понимают воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции в данной точке.

Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются вихревыми.

За *положительное направление вектора* принимается направление от южного полюса *S* к северному полюсу *N* магнитной стрелки, свободно ориентирующейся в магнитном поле.

Направление магнитного поля можно найти по **правилу обхвата правой рукой**: если большой палец правой руки направить по направлению тока в проводнике, то направление четырех пальцев, обхвативших проводник, покажут направление силовых линий магнитного поля (рис. 69.4, д).

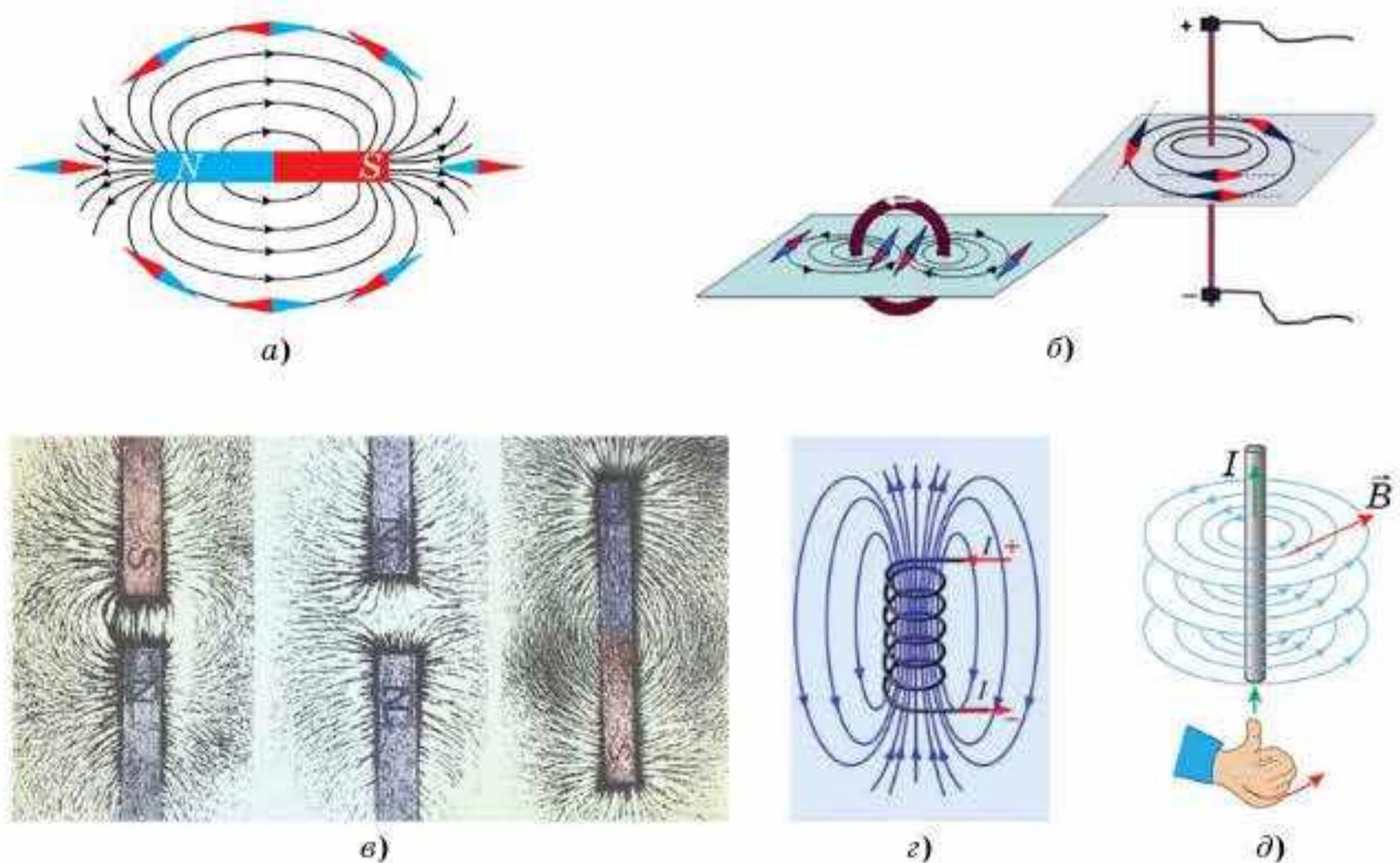


Рис. 69.4

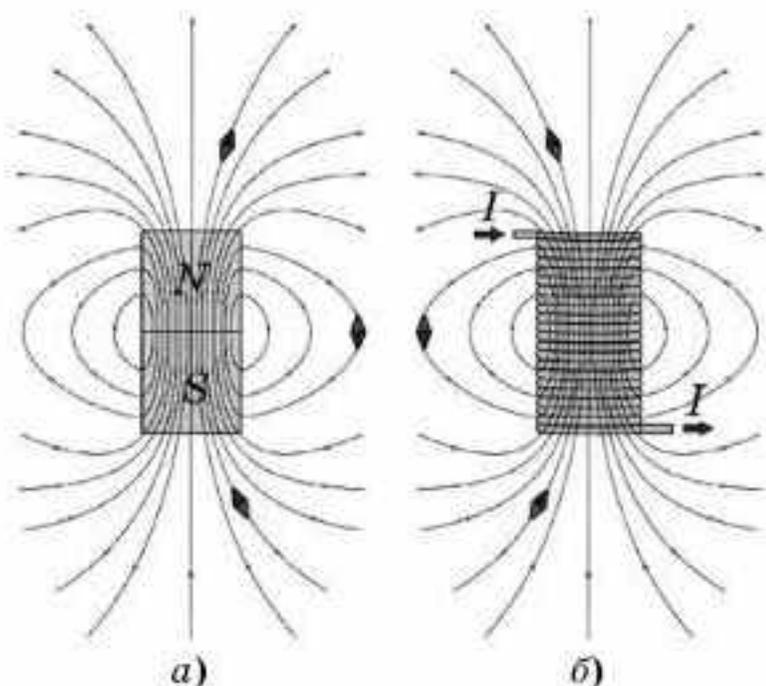


Рис. 69.5. Линии магнитной индукции полей:
a — постоянный магнит; *б* — катушка с током. (Индикаторные магнитные стрелки ориентируются в направлении касательных к линиям индукции)

На рисунке 69.5 изображены силовые линии магнитного поля постоянного магнита и катушки с током. Из рисунка видно, что внутри катушки и внутри постоянного магнита силовые линии магнитного поля идут от южного к северному полюсу, а снаружи, наоборот, от северного к южному. Нам кажется, что силовые линии магнитного поля как бы “выходят” из северного полюса и “входят” в южный полюс.

В свое время А. М. Ампер высказал гипотезу о том, что магнитное поле Земли и полосового магнита вызвано микротоками, циркулирующими внутри Земли и магнита. Эта гипотеза получила подтверждение

после открытия строения атомного ядра. В роли микротоков выступили электроны,двигающиеся по окружности вокруг своих ядер.

Взаимодействие параллельных токов. Как уже было сказано ранее, А. М. Ампером было установлено, что, если по двум параллельным проводникам электрические токи текут в одну и ту же сторону, то наблюдается взаимное притяжение проводников. Если токи текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются. Их взаимодействие вызывается их магнитными полями: магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток, и наоборот.

Опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной Δl каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока I_1 и I_2 в проводниках, длине отрезка Δl и обратно пропорционален расстоянию между ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}. \quad (69.3)$$

В Международной системе единиц (СИ) коэффициент пропорциональности k принято записывать в виде

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi}, \quad (69.4)$$

где μ_0 — постоянная величина, которую называют магнитной постоянной. Введение магнитной постоянной в СИ упрощает запись ряда формул. Ее численное значение равно

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}. \quad (69.5)$$

С учетом этого формула, выражающая закон магнитного взаимодействия параллельных токов, принимает вид

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta}{2\pi R}. \quad (69.6)$$

Отсюда нетрудно получить выражение для индукции магнитного поля каждого из прямолинейных проводников. Магнитное поле прямолинейного проводника с током должно обладать осевой симметрией и, следовательно, замкнутые линии магнитной индукции могут быть только концентрическими окружностями, расположенными в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Это означает,

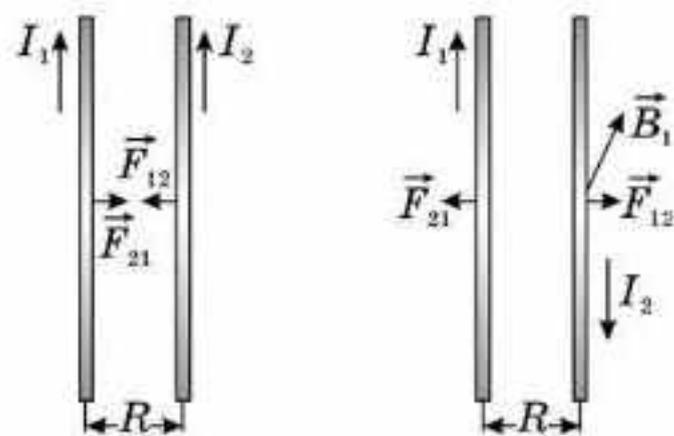


Рис. 69.6

что векторы B_1 и B_2 магнитной индукции параллельных токов I_1 и I_2 лежат в плоскости, перпендикулярной обоим токам (рис. 69.6). А модуль индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током I_1 на расстоянии R от него выражается соотношением

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi R}. \quad (69.7)$$

Модуль индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током I_2 на расстоянии R от него выражается соотношением

$$B_2 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi R}. \quad (69.8)$$

Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц для определения единицы силы тока ампера:

Ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную 0,2 мкН на каждый метр длины.

Индукция магнитного поля зависит от формы проводника, по которому идет ток. Величина модуля индукции магнитного поля в центре кругового витка с током радиусом R находится по формуле

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (69.9)$$

Величина модуля индукции магнитного поля внутри соленоида (бесконечной катушки) находится по формуле:

$$B = \mu_0 n I, \quad (69.6)$$

где n определяет число витков на единицу длины, т. е. $n = \frac{N}{l}$.



Вопросы для самоконтроля

1. Кто и как доказал связь электрических и магнитных явлений?
2. Расскажите об опыте Эрстеда. Какой вывод можно сделать из этого опыта?
3. Что обнаружил Ампер, пропуская ток по двум параллельным проводникам, расположенным близко друг к другу?
4. Как ведет себя рамка, по которой течет ток в магнитном поле?
5. Что вы понимаете под силовым полем?
6. Какие взаимодействия называются *магнитными*?
7. Назовите основные свойства магнитного поля.
8. В чем состоит отличие силовых линий постоянного магнитного поля от силовых линий электростатического поля?
9. Как находят направление силовых линий магнитного поля?
10. Как Ампер объяснял магнетизм Земли?
11. С помощью какой формулы можно рассчитать силу магнитного взаимодействия параллельных токов?
12. Зависит ли индукция магнитного поля от формы проводника, по которому идет ток?



Рефлексия

1. Урок навел на размышления...
2. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
3. Какие приобретенные на этом уроке знания пригодятся вам в дальнейшей жизни?
4. Что нового вы узнали на уроке?

§ 70. Сила Ампера



Ключевые понятия: сила Ампера, правило левой руки.

На этом уроке вы научитесь определять силу действия магнитного поля на проводник с током.

Для того чтобы количественно описать магнитное поле, нужно указать способ определения не только направления \vec{B} , но и его модуля. Проще всего это сделать, внося в исследуемое магнитное поле проводник с током и измеряя силу, действующую на отдельный прямолинейный участок этого проводника.

В 1820 г. французский физик А. М. Ампер экспериментально показал, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, прямо пропорционально зависит от силы тока в проводнике, от длины его активной части (т. е. от длины той части, которая находится в магнитном поле), от величины магнитного поля. Для этого он помещал проводник с током между полюсами подковообразного магнита (рис. 70.1) и менял силу тока, магнитное поле и длину активной части проводника. Кроме этого, Ампер установил, что величина силы, с которой магнитное поле действует на проводник с током, зависит от расположения проводника в магнитном поле. Если проводник с током перпендикулярен линиям индукции магнитного поля, то величина силы максимальна, если проводник с током параллелен силовым линиям магнитного поля, то сила равна нулю. Обобщив результаты своих опытов, Ампер получил формулу для вычисления силы, с которой магнитное поле действует на проводник с током. Ее назвали силой Ампера и находится она по формуле:

$$F_A = B I \Delta \sin \alpha,$$

где B — вектор магнитной индукции, I — сила тока в проводнике, Δ — длина активной части проводника, α — угол между вектором магнитной индукции и силой тока в проводнике.

Направление силы Ампера находят по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца руки направить по току, то отставленный под углом 90° большой палец покажет направление силы Ампера (рис. 70.2).

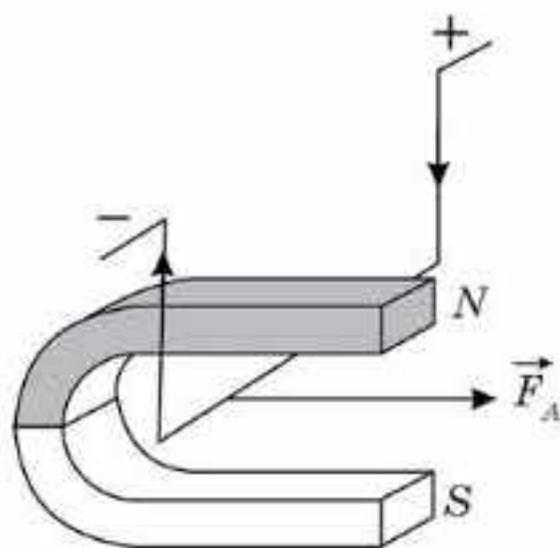


Рис. 70.1

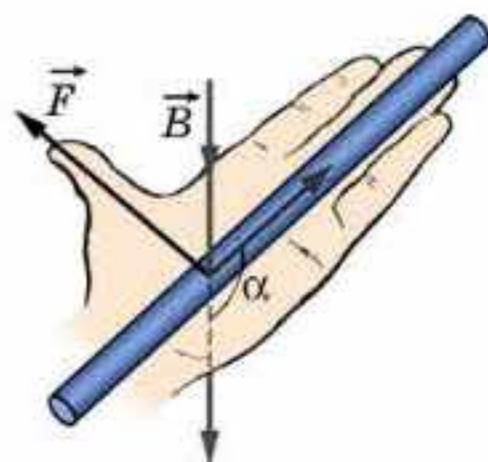


Рис. 70.2

Когда проводник с током перпендикулярен линиям индукции магнитного поля, то сила максимальна и равна

$$F_{\max} = BIl. \quad (70.1)$$

Из формулы (70.1) следует, что под вектором магнитной индукции следует понимать физическую величину, определяемую силой, с которой магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}. \quad (70.2)$$

В Международной системе единиц СИ индукция магнитного поля измеряется в теслах (Тл), которая названа в честь сербского ученого Никола Тесла (1856—1943)

$$\text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$



Вопросы для самоконтроля

1. Какая сила называется *силой Ампера*?
2. Как находят направление силы Ампера?
3. Каков физический смысл вектора магнитной индукции?
4. Что понимают под 1 Тл?
5. Сформулируйте правило левой руки.
6. Используя правило “обхвата правой рукой” и правило “левой руки”, докажите, что параллельные токи притягиваются, если они текут в одном направлении, и отталкиваются, если текут в противоположных направлениях.

Примеры решения задач

1. В вертикальном однородном поле на двух тонких нитях горизонтально подвешен проводник массой 0,16 кг и длиной 80 см. Концы проводника при помощи гибких проводов, находящихся вне поля, подсоединены к источнику тока. Найдите угол, на который отклоняются от вертикали нити подвеса, если по проводнику течет ток силой 2 А, индукция магнитного поля 1 Тл.

Дано:

$$L = 0,80 \text{ м}$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$m = 0,16 \text{ кг}$$

$$\alpha = ?$$

Решение. Так как тонкие и гибкие проводники $|AC|$ и $|BD|$ вынесены за пределы поля \vec{B} , то сила Ампера действует только на проводник $|CD|$ (рис. 70.3, а, б). На проводник действуют две силы натяжения \vec{F}_n , сила Ампера \vec{F}_A , направление которой находим по “правилу левой руки”, и сила тяжести $m\vec{g}$. Причем их результирующая сила \vec{F}_p должна быть направлена параллельно нитям

$|AC|$ и $|BD|$ и компенсировать силы натяжения в нитях, так как проводник находится в покое.

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{IBL}{mg}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \text{ А} \cdot 1 \text{ Тл} \cdot 0,8 \text{ м}}{0,16 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 1,$$

или по рисунку 1, б:

$$F_n \sin \alpha = F_A; F_n \cos \alpha = mg \text{ и } \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg}, \text{ т. е. } \alpha = 45^\circ.$$

2. Проводящий стержень массой 100 г и длиной 25 см лежит на горизонтальной поверхности перпендикулярно горизонтальному магнитному полю с индукцией 0,2 Тл (рис. 70.4). Какую горизонтальную силу нужно приложить перпендикулярно оси стержня для его равномерного поступательного движения, если по стержню течет ток 10А? Коэффициент трения между стержнем и поверхностью 0,2.

Решение. На рисунке 70.5 изобразим направление силовых линий магнитного поля и найдем направление силы Ампера, используя правило левой руки, учитывая, что ток в стержне направлен к нам. Изобразим все силы, действующие на проводник, и применим к движению проводника второй закон Ньютона в проекциях на оси

$$Ox: F - F_{\text{тр.}} = 0 \text{ и } Oy: N - mg - F_A = 0.$$

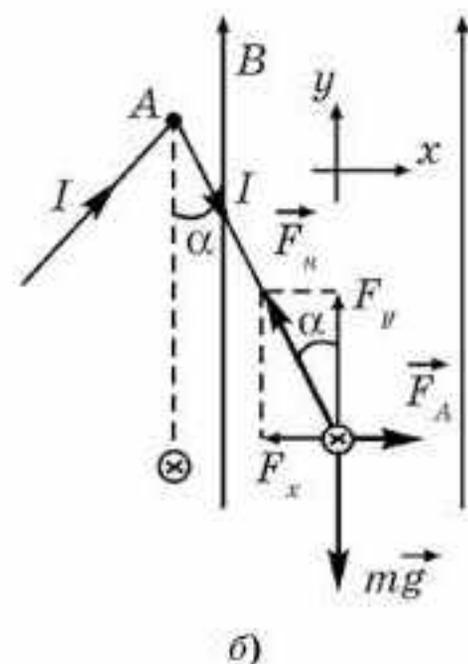
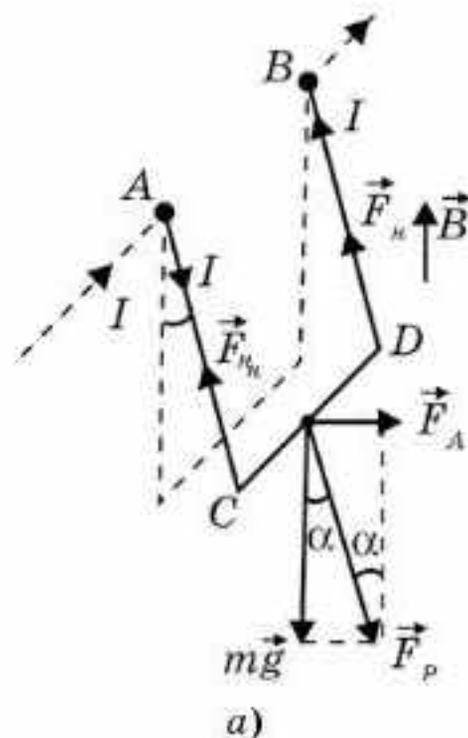


Рис. 70.3

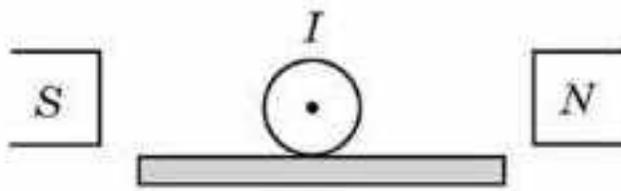


Рис. 70.4

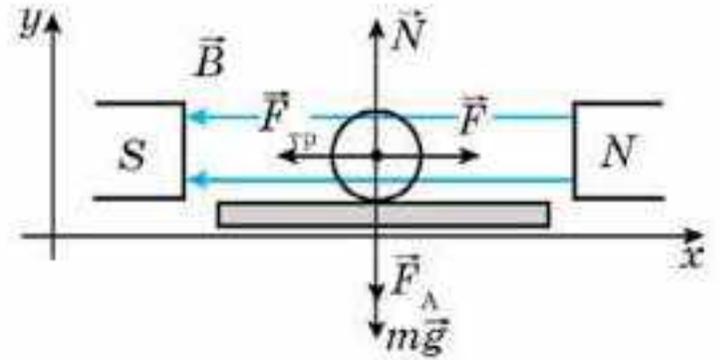


Рис. 70.5

Так как $F_{\text{тр}} = \infty N$, то $F_{\text{тр}} = \infty(mg + F_A) = \infty(mg + BIl)$. Поэтому $F = F_{\text{тр}} = \infty(mg + BIl)$; $F = 0,2(1H + 0,5H) = 0,3H$.

3. Кольцо из проводника поместили в магнитное поле, перпендикулярное его плоскости. По кольцу циркулирует ток I . Если проводник выдерживает на разрыв нагрузку F , то при какой индукции магнитного поля кольцо разорвется? Радиус кольца равен R . Действием на кольцо магнитного поля, создаваемого током I , пренебречь.

Дано:
 I, F, R

 $B - ?$

Решение. Выделим в кольце “элемент тока” $I\Delta l$ (рис. 70.6). При выбранном направлении силы тока I и индукции магнитного поля B на элементы кольца будут действовать силы Ампера, растягивающие его, и в кольце возникнут силы F , создающие в нем механическое напряжение.

(В принципе можно было бы поставить вопрос по-другому: “При какой индукции B кольцо разорвется?”, но для этого необходимо знать, из какого материала оно сделано.) Так как элемент кольца находится в покое, то результирующая сил F скомпенсирована силой Ампера. Стянем элемент кольца в точку A (рис. 70.6, б). Внимательно посмотрев на

рис. 70.6, а, б, можно сразу выразить $F_p = 2F \sin \frac{\alpha}{2} = 2F \frac{\alpha}{2} = F\alpha$ (поскольку элемент кольца Δl мал, то $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$). Тогда $IB\Delta l = F\alpha$; $\Delta l = R\alpha$ (рис. 70.6, а), тогда $IBR\alpha = F\alpha$. Окончательно имеем $F = IBR$; $B = \frac{F}{IR}$.

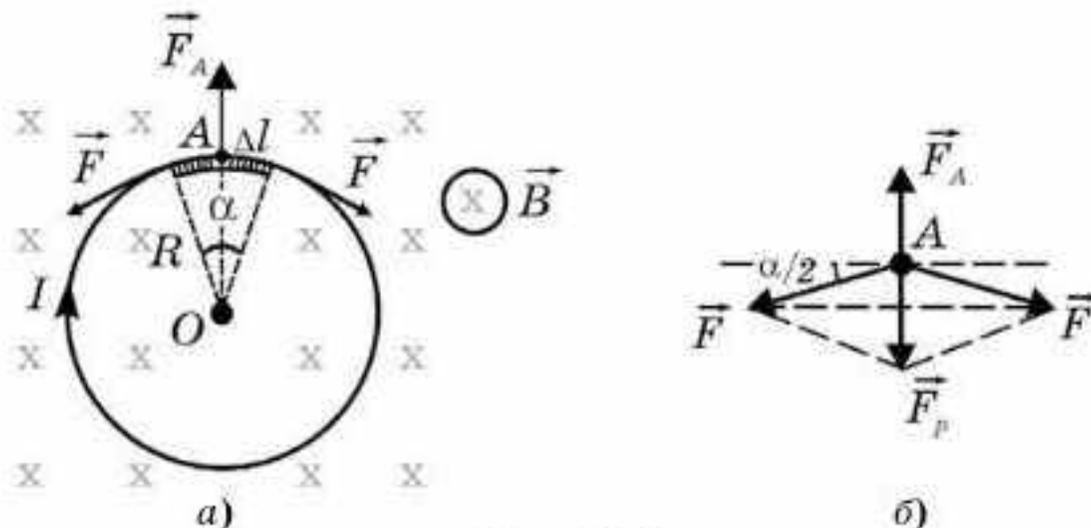


Рис. 70.6



Творческая мастерская

Наблюдайте

Рассмотрите процесс взаимодействия двух постоянных магнитов. Как изменится характер их взаимодействия, если поменять полюса?

Анализируйте

1. Какое направление имеет вектор \vec{B} индукции магнитного поля, созданного проводником с током, в точке M (рис. 70.7)?

2. Два параллельных проводника с током (рис. 70.8) притягиваются. Как направлен ток в верхнем проводнике, если в нижнем он направлен влево?

Решайте

1. Прямолинейный проводник длиной 1 см, по которому течет ток 1,5 А, находится в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Определите силу, действующую на проводник, если силовые линии магнитного поля параллельны оси проводника.

(Ответ: 0 Н)

2. Какова индукция магнитного поля, в котором на проводник с длиной активной части 5 см действует сила 50 мН? Сила тока в проводнике 10 А. Проводник расположен перпендикулярно вектору индукции магнитного поля.

(Ответ: 0,1 Тл)

3. Проводник длиной 40 см подвешен горизонтально к двум динамометрам и помещен в горизонтальное однородное магнитное поле с индукцией 0,5 Тл, силовые линии которого перпендикулярны проводнику. Насколько изменятся показания каждого динамометра, если по проводнику потечет ток 12 А?

(Ответ: 1,2 Н)

4. Проводник массой 0,2 кг и длиной 0,6 м лежит на горизонтальных рельсах, расположенных в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, силовые линии которого горизонтальны и направлены вдоль рельсов (рис. 70.9, вид сверху). Если пропустить по проводнику ток 20 А, то для того, чтобы сдвинуть проводник влево, требуется приложить горизонтальную силу 0,5 Н. Какая минимальная сила потребуется для этого, если направление тока в проводнике изменить на противоположное?

(Ответ: 2 Н)

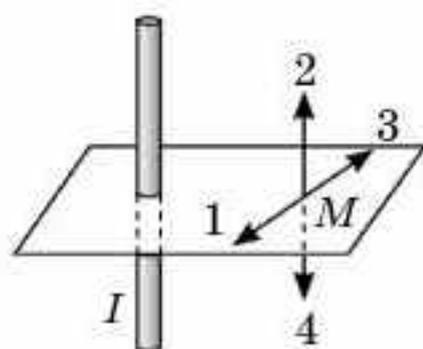


Рис. 70.7

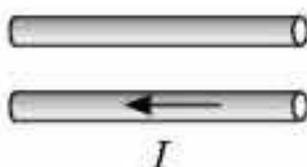


Рис. 70.8

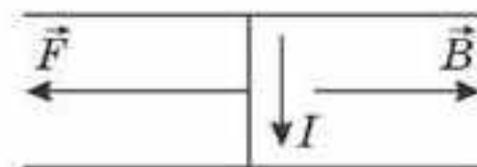


Рис. 70.9

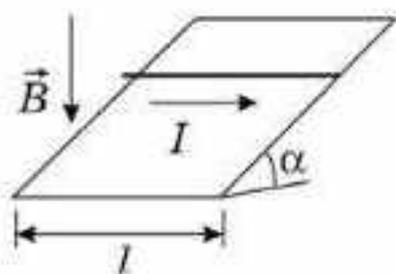


Рис. 70.10

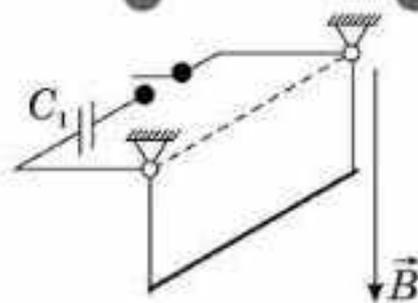


Рис. 70.11

5. Металлический стержень массой $0,5$ кг и длиной 1 м соскальзывает с наклонной плоскости, составляющей угол 30° с горизонтом. В пространстве создано однородное магнитное поле с индукцией $0,1$ Тл, силовые линии которого направлены вертикально вниз. Определите ускорение этого стержня, если по нему пропустить ток 5 А в направлении, показанном на рис. 70.10. Коэффициент трения между стержнем и поверхностью наклонной плоскости $0,2$.

(Ответ: $2,5$ м/с²)

*6. Проводящий стержень подвешен горизонтально на двух легких проводах в магнитном поле, силовые линии которого направлены вертикально вниз. К точкам крепления провода можно подключать конденсатор (рис. 70.11). Определите емкость C_1 конденсатора, при разрядке которого стержень отклонится от вертикали на угол 5° , если при разрядке заряженного до такого же напряжения конденсатора емкостью $C_2 = 30$ мкФ угол отклонения 3° .

(Ответ: 50 мкФ)

7. Две параллельные проводящие шины лежат в горизонтальной плоскости и замкнуты с одной стороны на источник тока с ЭДС 10 В и внутренним сопротивлением $0,1$ Ом. На шинах лежит металлический стержень массой 10 г. Шины находятся в однородном магнитном поле. Определите модуль и направление минимальной магнитной индукции, при которой стержень начнет перемещаться по шинам. Расстояние между шинами $0,1$ м, коэффициент трения стержня о шины $0,6$. Сопротивления шин и стержня не учитывать.

(Ответ: 6 мТл)

8. В прямом проводнике длиной 8 см сила тока 50 А. Он находится в однородном магнитном поле с индукцией 20 мТл, причем силовые линии поля перпендикулярны проводнику. Какую работу совершил источник тока, если проводник переместился на расстояние 10 см перпендикулярно линиям индукции?

(Ответ: 8 мДж)



Рефлексия

1. Урок навел на размышления...
2. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
3. Какие приобретенные на этом уроке знания пригодятся вам в дальнейшей жизни?
4. Что нового вы узнали на уроке?

§ 71. Контур с током в магнитном поле



Ключевые понятия: магнитный поток, рамка с током в магнитном поле.

На этом уроке вы разберетесь с поведением рамки с током в магнитном поле.

Для более полной характеристики магнитного поля введем еще одну физическую величину — *магнитный поток*, или *поток вектора магнитной индукции*.

Расположим площадку площадью ΔS перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Очевидно, что число силовых линий, пронизывающих площадку пропорционально площади ΔS и “концентрации” силовых линий (т.е. от модуля вектора магнитной индукции). Поэтому под магнитным потоком понимают физическую величину, определяемую числом силовых линий, проходящих через площадку, расположенную перпендикулярно магнитному полю, т. е. (рис. 71.1):

$$\Phi = B \cdot \Delta S \cdot \cos\alpha. \quad (71.1)$$

В этом случае мы считаем магнитное поле однородным. Так как $B \cdot \cos\alpha = B_n$, где B_n — проекция вектора магнитной индукции на нормаль к площади поверхности, при этом

$$\Phi = B_n \cdot S.$$

Единицей измерения магнитного потока в Международной системе СИ является **Вебер**. $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

Магнитный поток равен 1 Вб, когда поверхность площадью 1 м² пронизывает индукция магнитного поля 1 Тл.

Рассмотрим плоский контур с током, который находится в однородном магнитном поле. В частном случае пусть это будет контур прямоугольной формы (рис. 71.2). В соответствии с законом Ампера, на стороны $|AB| = |DC| = a$ действуют силы Ампера:

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F = IBa \quad (\sin\alpha = 1).$$

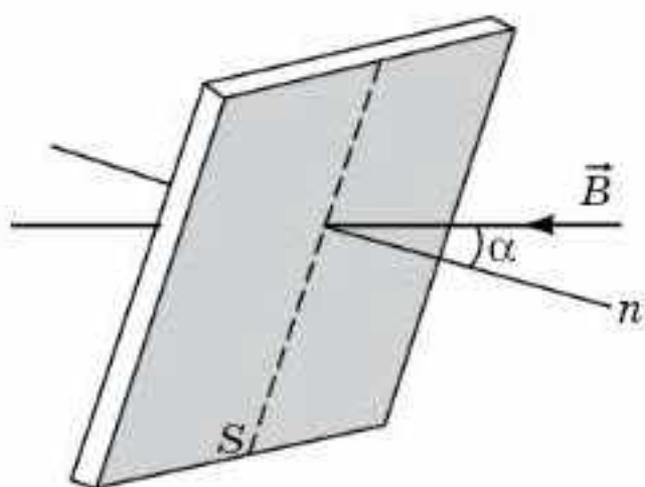


Рис. 71.1

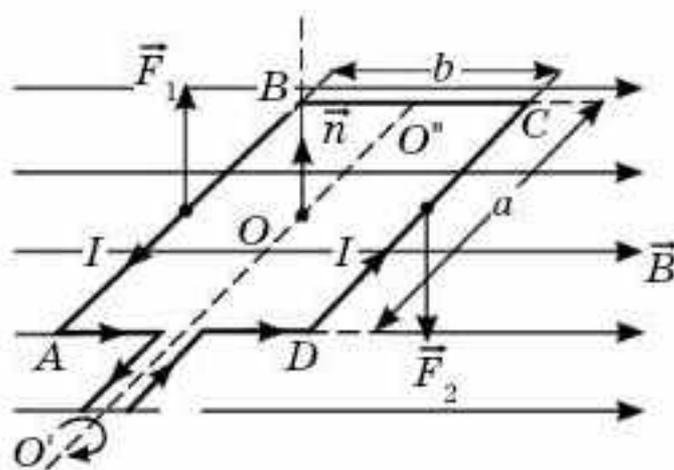


Рис. 71.2

На стороны $|BC| = |AD|$ силы не действуют, так как $\sin \alpha = 0$. Относительно оси $O'O''$ на контур будет действовать максимальный момент сил Ампера, поскольку в этом случае “плечи” сил максимальны. Тогда:

$$M_{\max} = I Ba \frac{b}{2} + I Ba \frac{b}{2}; M_{\max} = I Bab,$$

где $ab = S$ — площадь, ограниченная контуром, по которому течет ток I , т. е.

$$M_{\max} = IBS. \tag{71.2}$$

В таком положении (рис. 71.2) поток вектора индукции магнитного поля сквозь поверхность равен нулю (формула 71.1). Пусть рамка повернется на некоторый угол, вместе с ней на такой же угол повернется и нормаль к рамке. Обозначим через α угол между \vec{n} и \vec{B} . Теперь на все стороны рамки будут действовать силы Ампера. На стороны $|AB|$ и $|DC|$ окажут воздействие те же силы, что и на рисунке 71.3, но “плечи” их уменьшатся. На стороны $|AD|$ и $|BC|$ будут действовать силы, растягивающие контур, причем на сторону AD вектор силы Ампера будет направлен к нам, а на $|BC|$ — от нас, но они не будут создавать вращающего момента, так как направлены вдоль оси $O'O''$ (на рис. 71.3 они не показаны). Тогда момент пары сил относительно оси $O'O''$ будет равен $M = 2F \frac{b}{2} \sin \alpha$, так как $\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$. Окончательно имеем:

$$M = IBab \sin \alpha, \text{ или } M = IBS \sin \alpha.$$

При этом механический момент сил Ампера уменьшится, а магнитный поток $\Phi = BS \cdot \cos \alpha$ увеличится.

Плоский контур, продолжая вращаться, примет положение, указанное на рисунке 71.4, из которого видно, что результирующий момент сил Ампера равен нулю. (Силы растягивают контур, и если бы он не был жестким, то превратился бы в окружность.) Магнитный поток в

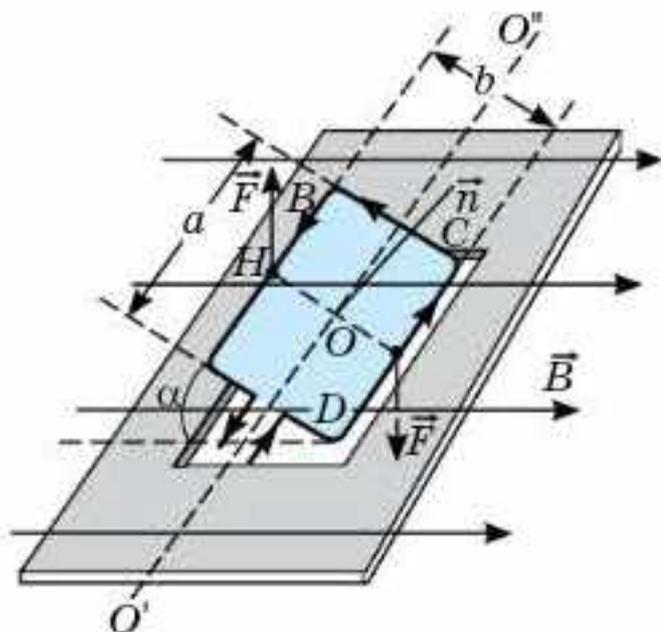


Рис. 71.3

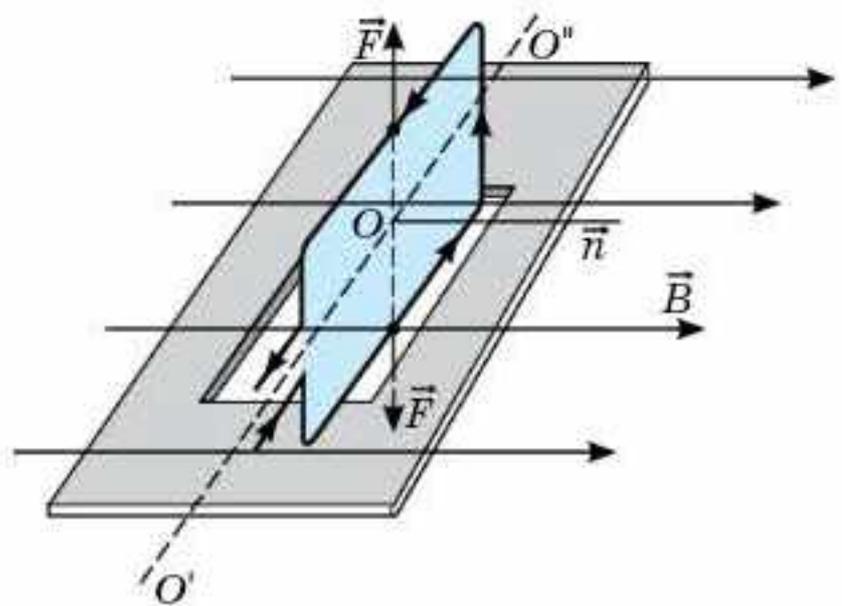


Рис. 71.4

этом положении будет максимальным $\Phi_{\max} = BS$. Следует обратить особое внимание на три важных момента для этого положения контура:

1) это будет устойчивое положение контура во внешнем магнитном поле;

2) по правилу буравчика, магнитное поле \vec{B}_0 , создаваемое током в контуре, совпадет с направлением внешнего магнитного тока \vec{B} , т. е. контур с током установится в магнитном поле так же, как и магнитная стрелка (она своим северным концом укажет направление магнитного поля, в котором находится);

3) если в этом положении поменять направление тока в контуре, то он, пройдя по инерции положение устойчивого равновесия, будет продолжать вращаться в том же направлении: в результате этого получим электродвигатель.

Плоский контур произвольной формы в магнитном поле. Будут ли рассуждения, приведенные выше, справедливы для плоского контура произвольной формы?

Докажем, что момент сил Ампера, действующих на любую плоскую рамку с током, находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} , будет определяться по той же формуле, что и для плоского прямоугольного контура. Разобьем рамку с током на трапециевидные микроконтуры (рис. 71.5). При $\Delta x \rightarrow 0$ микротрапеции превращаются в прямоугольные рамки, на каждую из которых действует момент сил $\Delta M_i = B \Delta I_i \cdot \Delta S_i$; так как $\sum I_i = I$, $\sum S_i = S$, то $\sum \Delta M_i = BIS$. Следовательно,

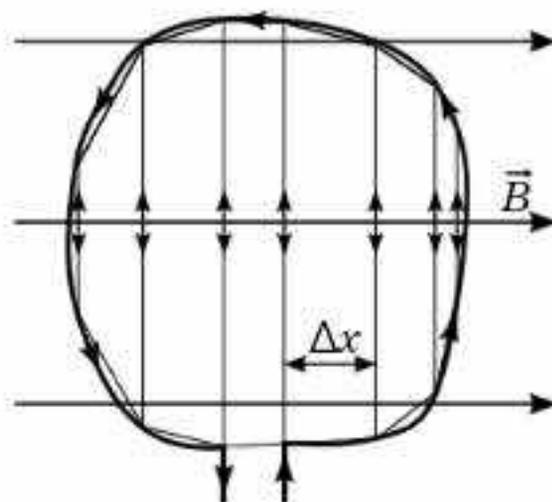


Рис. 71.5

$M = IB S$, что совпадает с максимальным моментом (см. формулу 71.2). Таким образом, при одинаковом токе и равных площадях на плоские рамки разных форм в магнитном поле действуют одинаковые моменты сил Ампера. Это позволяет экспериментально определять индукцию магнитного поля:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}, \tag{71.3}$$

что гораздо удобнее, чем по формуле

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}.$$

Механический момент сил Ампера можно измерить по моменту упругих сил, используя закон Гука для деформации кручения: $M = k\phi$, где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих

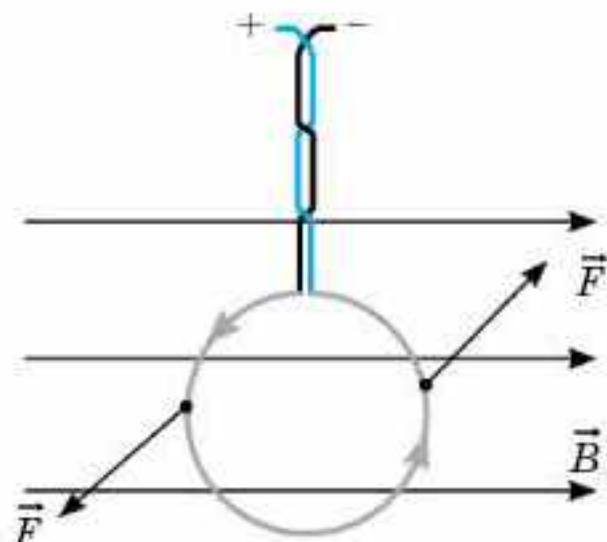


Рис. 71.6

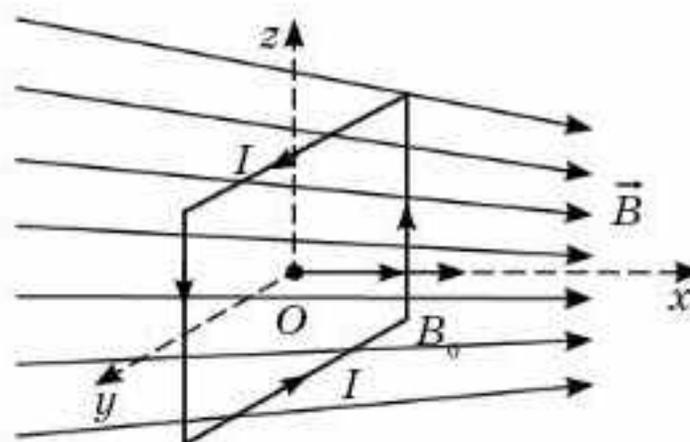


Рис. 71.7

свойств материала (его называют *постоянной кручения*), а ϕ — угол закручивания нити, на которой висит контур с током (рис. 71.6).

Интерес представляет вопрос: как будет вести себя плоский контур с током, который может вращаться вокруг осей x , y и z , если его поместить в неоднородное магнитное поле (рис. 71.7)?

Обобщая сказанное, можно сделать **выводы**:

1) контур установится в магнитном поле так, что собственное магнитное поле тока в контуре (\vec{B}_0) будет сонаправлено с внешним магнитным полем $|\vec{B}|$;

2) контур будет втягиваться в область более сильного магнитного поля (аналогично тому, как железные опилки притягиваются к магниту);

3) контур будет двигаться с ускорением.



Вопросы для самоконтроля

1. Как ведет себя в магнитном поле замкнутый контур, по которому идет ток?
2. Какая физическая величина называется *поток вектора магнитной индукции*, или *магнитным потоком*?
3. В чем заключается геометрическая интерпретация магнитного потока?
4. Как располагается контур с током в магнитном поле? Почему именно так?
5. Зависит ли поведение плоского контура с током в магнитном поле от его формы?
6. При каком положении рамки с током в магнитном поле действующий на нее момент сил Ампера максимален?

Примеры решения задач

1. Кольцо радиусом R , по которому циркулирует ток I , поместим в неоднородное аксиально-симметричное поле. Ось кольца совпадает с осью симметрии магнитного поля. Индукция магнитного поля \vec{B} , действующего на ток, направлена под углом α к оси симметрии поля. Масса кольца равна m . Определите его ускорение.

Дано:

R, I, B

α, m

$|\vec{a}|$ — ?

Решение. Из рисунка 71.8 видно, что на выделенные элементы тока Δl_i со стороны составляющей магнитного поля $B_x = B \cos \alpha$ действуют силы, сжимающие кольцо. (Какое это равновесие?) Из соображений симметрии, результирующая этих сил будет равна нулю и ускорения вызывать не будет.

Со стороны составляющих $B_y = B \sin \alpha$ на элемент кольца Δl_i будет действовать сила $\Delta F_i = (IB \sin \alpha) \Delta l_i$. Сумма

$$\sum_{i=1}^{\infty} \Delta F_i = IB \sin \alpha \sum_{i=1}^{\infty} \Delta l_i.$$

Очевидно, что, $\sum_{i=1}^{\infty} \Delta l_i = 2\pi R$, а $\sum_{i=1}^{\infty} F_i = F_p$,

т. е. $F_p = 2\pi RIB \sin \alpha$. Эта сила заставит кольцо двигаться вправо. Тогда, по второму закону Ньютона, кольцо приобретает ускорение

$$a = \frac{F_p}{m}, \text{ или } a = \frac{2\pi RIB \sin \alpha}{m}.$$

2. Проволочная рамка в виде окружности с током может вращаться вокруг горизонтальной оси OO' (рис. 71.9). Масса единицы длины проволоки ρ , ток в рамке I . Рамка находится в магнитном поле индукции \vec{B} , направленном вдоль поля тяжести. Определите угол отклонения плоскости окружности от вертикали.

Дано:

$\rho; I; B$

β — ?

Решение. Если решать задачу, как ту, где говорилось о квадратной рамке, то этот пример еще сложнее, поскольку придется суммировать силы Ампера, действующие на каждый элемент кольца. Проще решить задачу, приравняв момент силы тяжести к моменту сил Ампера. Относительно OO' момент силы тяжести равен $M_1 = mgd$ (рис. 71.10).

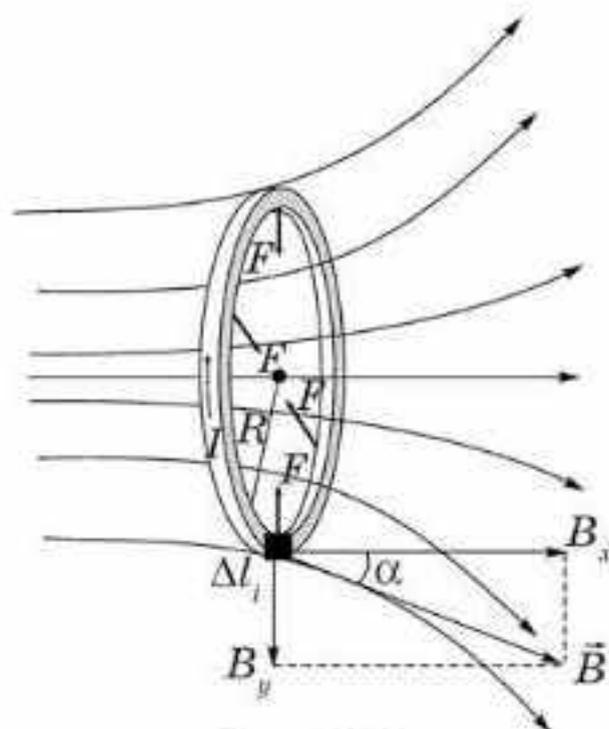


Рис. 71.8

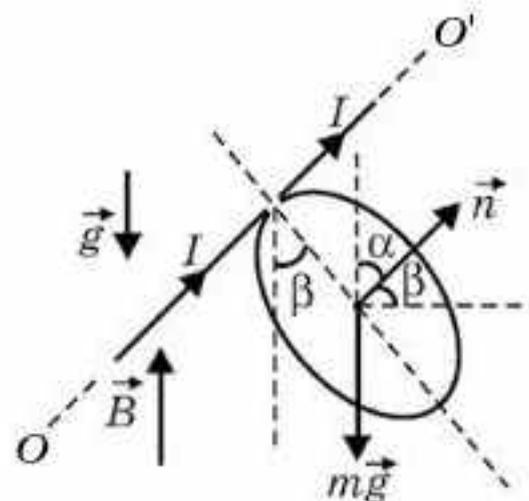


Рис. 71.9

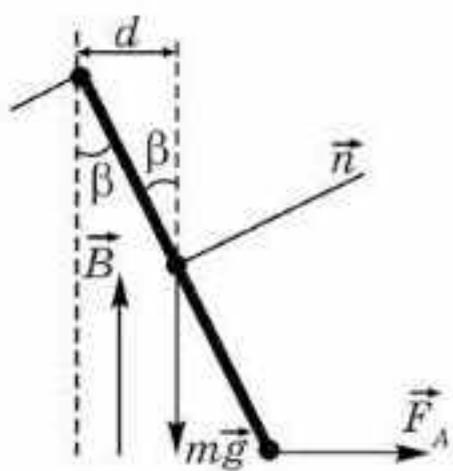


Рис. 71.10

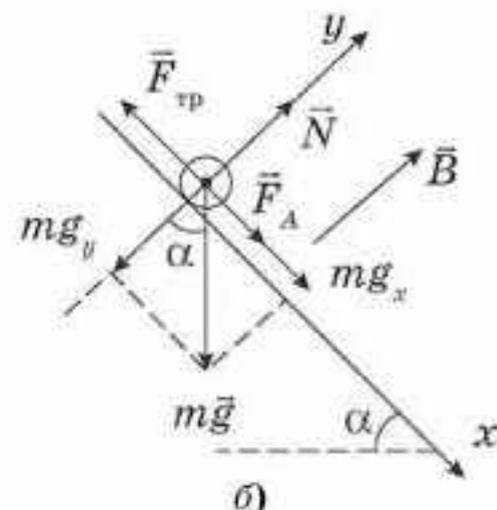
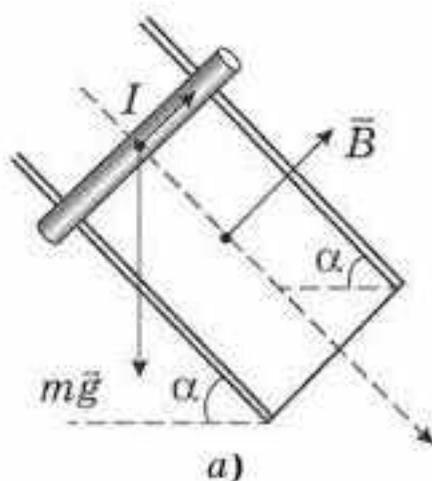


Рис. 71.11

Так как $m = \rho l = \rho 2\pi R$, а $d = R \sin \beta$, то $M_1 = \rho 2\pi R g R \sin \beta$. Момент сил Ампера относительно OO' равен $M_2 = IBS \sin \alpha$, поскольку $\alpha = 90^\circ - \beta$, а $S = \pi R^2$, то $M_2 = IB\pi R^2 \cos \beta$.

Тогда $\rho 2\pi R g R \sin \beta = IB\pi R^2 \cos \beta$, откуда:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{IB}{2\rho g}.$$

3. Стержень расположен перпендикулярно рельсам, расстояние между которыми $l = 50$ см (рис. 71.11, а). Рельсы составляют с горизонтом $\alpha = 30^\circ$. Какой должна быть индукция магнитного поля перпендикулярно плоскости рельсов, чтобы стержень начал двигаться, если по нему пропустить ток силой $I = 40$ А? Коэффициент трения стержня о рельс $\infty = 0,6$, масса стержня $m = 1$ кг.

Дано:

$$l = 50 \text{ см}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$I = 40 \text{ А}$$

$$\infty = 0,6$$

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$|\vec{B}| \text{ — ?}$$

Решение. На рис. 71.11, а изображено условие задачи. На таком пространственном чертеже трудно показать силы, действующие на стержень. Поэтому сделаем рисунок вида сбоку (рис. 71.11, б). В проводнике ток идет от нас, поэтому сила Ампера, согласно правилу левой руки, направлена параллельно рельсам вниз. Расстановка сил и их проекций сведена к обычной наклонной плоскости. В этом случае сила Ампера помогает стержню соскальзывать с наклонной плоскости. Далее, как обычно, записываем второй закон Ньютона в проекции на ось x :

$$F_A + mg_x = F_{\text{тр}}, \text{ или } IBl + mgs \sin \alpha = \infty \cdot N; \text{ на ось } y: N = mg \cos \alpha.$$

Объединив эти выражения, имеем: $IBl + mgs \sin \alpha = \infty mg \cos \alpha$. Откуда

$$|\vec{B}| = \frac{mg(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{Il} \text{ для движения вниз. При противоположном направлении тока (или другом направлении магнитной индукции } |\vec{B}|) \text{ для}$$

движения вверх получим: $|\vec{B}| = \frac{mg(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{Il}$.

В этой задаче важно проконтролировать себя, ведь стержень может соскальзывать и без силы Ампера. Это случается при $\infty \cos \alpha - \sin \alpha = 0$,

при $B = 0$, т. е. при $\alpha = \text{tg} \alpha$. Для $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 0,5774$, что чуть меньше заданного коэффициента трения, т. е. стержню все-таки надо помогать соскальзывать вниз, тем более двигаться вверх.

4. Жесткое тонкое кольцо из проводника лежит на горизонтальной поверхности из диэлектрика и находится в однородном магнитном поле, линии индукции которого горизонтальны (рис. 71.12). Масса кольца m , радиус R , величина индукции B . Какой ток нужно пропустить по кольцу, чтобы оно начало приподниматься?

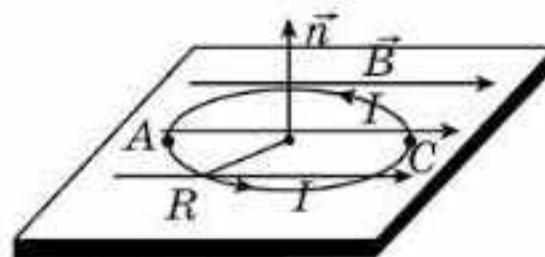


Рис. 71.12

Дано:
 m, R, B

 $I - ?$

Решение. Воспользуемся правилом моментов сил. На контур действуют два момента сил. Причем момент силы тяжести должен быть чуть меньше момента силы Ампера: $mgR \leq IBS$, где S — площадь плоского контура, обтекаемого током I , т. е. $mgR \leq IB\pi R^2$, откуда

$$I \geq \frac{mg}{\pi BR}.$$

Интересно, какой конец кольца — A или C — начнет приподниматься при заданном направлении силы тока и индукции магнитного поля \vec{B} ? (См. рис. 71.14).

5. Магнитогидродинамический насос для перекачки жидких (расплавленных) металлов имеет участок в виде канала квадратного сечения со стороной a . Он находится в однородном магнитном поле. При пропускании через боковые электроды перпендикулярно магнитному полю тока $I = 100\text{A}$ в насосе создается перепад давления $\Delta P = 0,5\text{кПа}$. Определите индукцию магнитного поля.

Дано:
 $a, I, \Delta p$

 $|\vec{B}| - ?$

Решение. Так как жидкий металл является хорошим проводником (носителями электрического тока в котором являются электроны и положительные ионы), то со стороны магнитного поля на движущийся жидкий металл будет действовать сила Ампера.

Если скорость металла, входящего в насос, v_A , то при выходе она будет v_B (рис. 71.13). Причем при заданном направлении векторов $\vec{v}_A, \vec{v}_B, \vec{B}$ и силы тока I сила Ампера будет направлена от точки A к точке C , т. е. $v_B > v_A$. Тогда при установившемся движении жидкости $p_A S = p_B S + I Ba$, т. е. $\Delta p S = I Ba$; или $\Delta p a^2 = I Ba$, откуда $B = \frac{\Delta p \cdot a}{I}$.

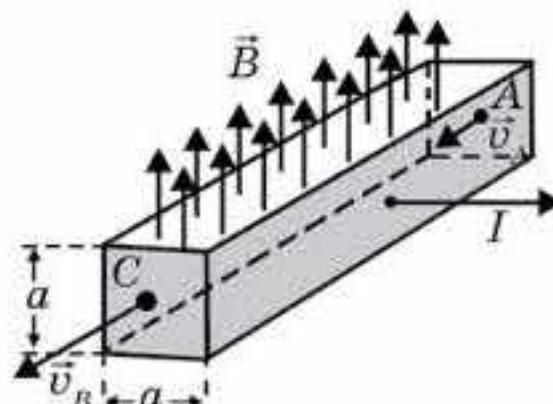


Рис. 71.13

6. Катушка, по виткам которой течет ток I , расположена вертикально на горизонтальной плоскости. Масса катушки m , число витков N , радиус R . При какой индукции B однородного магнитного поля, направленного горизонтально, она опрокинется?

Дано:

I, m, N

$B - ?$

Решение. Данная задача практически ничем не отличается от задачи 4. Действительно, контур будет стремиться расположиться во внешнем магнитном поле так, чтобы \vec{B}_0 — собственное магнитное поле катушки — было сонаправлено с внешним полем \vec{B} . Поэтому контур начнет вращаться относительно оси, которая проходит через точку A и перпендикулярна плоскости рисунка (рис. 71.14).

Точка C оторвется от стола на малое расстояние, но этого уже будет достаточно, чтобы катушка опрокинулась без дальнейшего увеличения внешнего поля \vec{B} . (Подумайте почему?) Из правила моментов сил относительно точки A имеем: $IBSN \geq mgR$, где $IBSN$ — момент сил Ампера (он должен быть чуть больше момента силы тяжести); $S = \pi R^2$ — площадь контура. Окончательно имеем $IB\pi R^2 N \geq mgR$, откуда следует, что $B \geq \frac{mg}{\pi RIN}$. Сила реакции опоры N_A относительно точки A не создает вращающего момента, так как ее плечо равно нулю.

7. Бесконечно длинный провод образует круговую петлю касательно провода (рис. 71.15). По проводу течет ток силой $I = 5$ А. Радиус петли $R = 10$ см. Определите индукцию магнитного поля в центре петли.

$$\left(B = \mu \frac{I}{2R} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right)$$

(Решите задачу самостоятельно, используя принцип суперпозиции.)

8. Внутри бесконечно длинного соленоида с током $I_1 = 4$ А расположен круговой контур радиусом $R = 0,5$ см, с током $I_2 = 1$ А так, что его плоскость параллельна магнитным линиям соленоида. На длине соленоида $l = 10$ см имеется $N = 40$ витков. Определите момент сил M , вращающих круговой контур. (Попробуйте решить задачу самостоятельно, опираясь на решения задач, предложенных авторами.)

$$\left(M = \mu_0 \pi R^2 I_1 I_2 \frac{N}{l} \right).$$

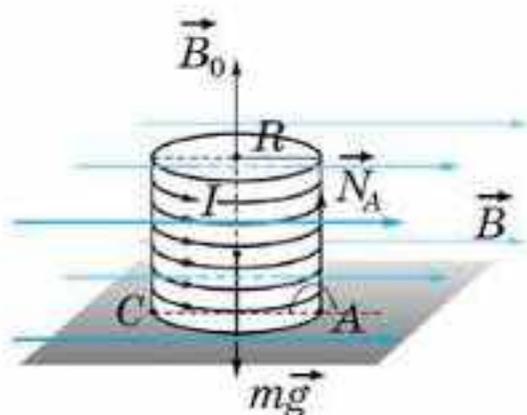


Рис. 71.14

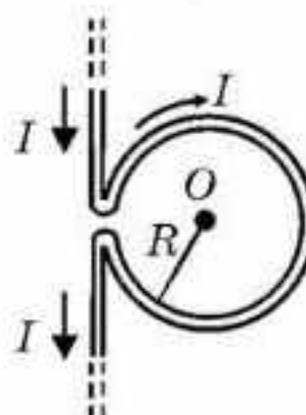


Рис. 71.15



Творческая мастерская

Решайте

1. Максимальный вращающий момент, действующий на рамку площадью 10 см^2 , находящуюся в однородном магнитном поле, равен $0,4 \text{ мН} \cdot \text{м}$. Сила тока в рамке 1 А . Найдите индукцию магнитного поля.

(Ответ: $0,4 \text{ Тл}$)

2. Рамка площадью 400 см^2 помещена в однородное магнитное поле так, что нормаль к рамке составляет угол 60° с вектором магнитной индукции $0,2 \text{ Тл}$. Сила тока в рамке 4 А . Найдите вращающий момент, действующий на рамку.

(Ответ: $4 \text{ мН} \cdot \text{м}$)

3. Короткая катушка с поперечным сечением площадью 150 см^2 , содержащая 200 витков провода, по которому течет ток 4 А , помещена в однородное магнитное поле с индукцией 10 мТл . Определите вращающий момент, действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол 60° с силовыми линиями поля.

(Ответ: $0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

*4. Контур, представляющий собой квадрат с перемычкой по диагонали, изготовлен из медной проволоки сечением 1 мм^2 и подключен к источнику постоянного напряжения 110 В (рис. 71.16). Плоскость квадрата параллельна линиям индукции магнитного поля с индукцией 2 мТл . Найдите модуль и направление силы, действующей на контур со стороны поля.

(Ответ: 22 Н)

*5. По кольцу радиусом 10 м , сделанному из медной проволоки сечением 1 мм^2 , течет ток 10 А . Кольцо помещено в однородное магнитное поле так, что его ось совпадает с направлением поля. При каком максимальном значении индукции магнитного поля кольцо не разорвется? Прочность меди на разрыв $\sigma = 230 \text{ МН/м}^2$.

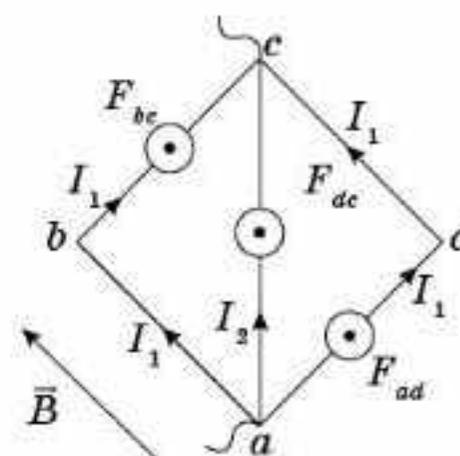


Рис. 71.16

(Ответ: $2,3 \text{ Тл}$)

Рефлексия

1. Урок навел на размышления...
2. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
3. Какие приобретенные на этом уроке знания пригодятся вам в дальнейшей жизни?
4. Что нового вы узнали на уроке?

§ 72. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в электрических и магнитных полях



Ключевые понятия: сила Лоренца, правило левой руки, движение частицы в электрическом и магнитном полях.

На этом уроке вы: исследуете действие магнитного поля на движущиеся частицы.

Сила Ампера — это сила, действующая на находящийся в магнитном поле отрезок проводника длиной Δl , по которому течет ток силой I . Силу тока можно выразить через среднюю скорость упорядоченного движения носителей заряда и их концентрацию:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t} = \frac{q_0 n V}{t} = \frac{q_0 n S l}{t} = q_0 n S v. \quad (72.1)$$

Тогда сила Ампера может быть выражена через силы, действующие на отдельные носители заряда:

$$F_A = B q_0 n v S \Delta l \sin \alpha. \quad (72.2)$$

Учтя тот факт, что общее число носителей заряда, прошедших через поперечное сечение S проводника длиной Δl , равно $N = n \cdot V = n S \Delta l$, получим, сила Ампера равна:

$$F_A = B q_0 N v \sin \alpha. \quad (72.3)$$

Отсюда следует, что сила, действующая со стороны магнитного поля на отдельную движущуюся в нем заряженную частицу, может быть вычислена по формуле:

$$F_{\text{л}} = B q_0 v \sin \alpha. \quad (72.4)$$

Угол α — это угол между вектором скорости частицы и вектором магнитной индукции. Эта сила впервые была рассчитана голландским физиком Лоренцем. Поэтому ее называют силой Лоренца. Направление силы Лоренца находят по правилу левой руки:

Если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца руки направить по движению частицы, то отставленный под углом 90° большой палец покажет направление силы Лоренца.

Правило левой руки справедливо для частицы, обладающей положительным зарядом.

Частица в электрическом поле. На заряженную частицу в электростатическом поле действует кулоновская сила, которую можно найти,

зная напряженность поля в данной точке: $F = Eq$. Эта сила сообщает ускорение:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m}, \quad (72.5)$$

где m и q — масса и заряд частицы. Направление ускорения будет совпадать с направлением вектора напряженности электрического поля, если заряд частицы положителен ($q > 0$), и будет противоположно ему, если заряд отрицателен ($q < 0$).

Если электростатическое поле **однородное**, то частица будет совершать равноускоренное движение (разумеется, при отсутствии других сил). Вид траектории частицы зависит от начальных условий. Если вначале заряженная частица покоилась ($v_0 = 0$) или ее начальная скорость сонаправлена с ускорением, то частица будет совершать равноускоренное прямолинейное движение вдоль поля и ее скорость будет возрастать. Если векторы начальной скорости и ускорения антипараллельны, то частица будет тормозиться в этом поле.

Если угол между начальной скоростью и ускорением острый $0 < \alpha < 90^\circ$ (или тупой), то заряженная частица в таком электростатическом поле будет двигаться по параболе.

Во всех случаях при движении заряженной частицы в электростатическом поле будет изменяться модуль скорости, а, следовательно, и кинетическая энергия частицы.

Частица в магнитном поле. Необходимо помнить, что магнитное поле *не действует на покоящуюся заряженную частицу*. Магнитное поле действует только на движущиеся в поле заряженные частицы. Кроме этого, сила Лоренца, действующая на заряженные частицы в магнитном поле, всегда перпендикулярна скорости их движения. Поэтому модуль скорости в магнитном поле не изменяется. Не изменяется, следовательно, и кинетическая энергия частицы. Вид траектории заряженной частицы в магнитном поле зависит от угла между скоростью влетающей в поле частицы и магнитной индукцией. Возможны три различных случая.

1. Заряженная частица влетает параллельно силовым линиям магнитного поля. В этом случае сила Лоренца на частицу не действует, и частица будет продолжать двигаться **равномерно прямолинейно**.

2. Частица влетает перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (рис. 72.1). В этом случае сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости частицы и магнитному полю и будет сообщать ей центростремительное ускорение:

$$a_n = \frac{F_n}{m} = \frac{Bqv}{m}. \quad (72.6)$$

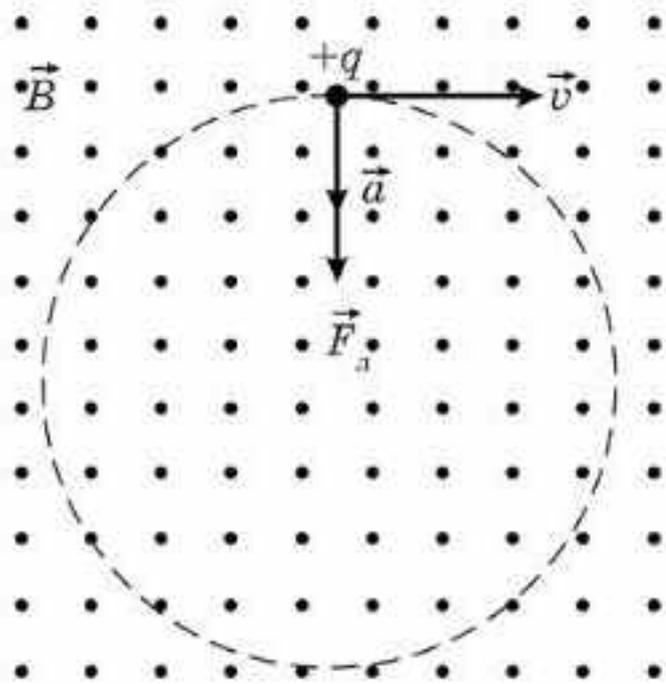


Рис. 72.1

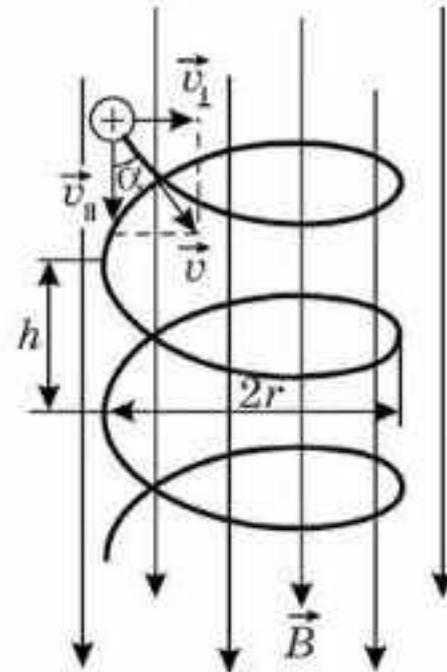


Рис. 72.2

В то же время центростремительное ускорение равно:

$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (72.7)$$

Следовательно, заряженная частица, влетевшая перпендикулярно магнитному полю, будет двигаться в нем по окружности радиусом:

$$R = \frac{mv}{Bq}. \quad (72.8)$$

Так как модуль скорости частицы не меняется, то можно рассчитать период обращения частицы $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{Bq}$. Из последней формулы видно, что период обращения частицы не зависит от ее скорости и радиуса траектории, а зависит только от удельного заряда частицы ($\frac{q}{m}$) и магнитной индукции поля, в которое она попала.

3. Частица влетает под углом к силовым линиям магнитного поля (рис. 72.2). Движение частицы можно представить как суммы двух движений: равномерного прямолинейного движения вдоль поля со скоростью $v_{||} = v \cos \alpha$ и движения по окружности с постоянной по модулю скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ в плоскости, перпендикулярной полю. В результате частица будет двигаться по винтовой линии, ось которой параллельна магнитному полю. Радиус окружности этой линии постоянен и равен:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{Bq}, \quad (72.9)$$

а шаг винта (тоже неизменный) находят по формуле:

$$h = T v \cos \alpha = \frac{2\pi m}{Bq} v \cos \alpha.$$

Направление, в котором закручивается спираль, зависит от знака заряда частицы.

4. Если скорость заряженной частицы составляет угол с направлением вектора индукции **неоднородного** магнитного поля, причем индукция поля возрастает в направлении движения частицы, то радиус окружности и шаг винта с ростом B уменьшаются. На этом основана фокусировка заряженных частиц в магнитном поле.

5. Если на движущуюся заряженную частицу помимо магнитного поля с индукцией B действует одновременно и электростатическое поле с напряженностью E , то равнодействующая сила, приложенная к частице, равна векторной сумме электрической силы и силы Лоренца: $\vec{F} = \vec{F}_э + \vec{F}_л$. Характер движения и вид траектории зависят в данном случае от соотношения этих сил и от направления электростатического и магнитного полей. Так, например, если векторы скорости заряженной частицы, напряженности электрического поля и индукции магнитного поля взаимно перпендикулярны, то можно добиться равномерного движения частицы в этих полях, а скорость частицы будет определяться соотношением $v = \frac{E}{B}$.



Вопросы для самоконтроля

1. Как будет двигаться заряженная частица, влетев в электрическое поле: а) параллельно его силовым линиям; б) перпендикулярно его силовым линиям; в) под углом к его силовым линиям?
2. Как будет двигаться в магнитном поле первоначально покоящаяся заряженная частица?
3. Какая сила заставляет двигаться заряженную частицу, попавшую в магнитное поле, по окружности? Как рассчитать радиус этой окружности?
4. Как будет двигаться в магнитном поле заряженная частица, влетев: а) перпендикулярно полю; б) под углом к линиям индукции поля?
5. Что называют *шагом винтовой линии*?
6. Заряженная частица влетела в неоднородное магнитное поле, индукция которого уменьшается в направлении движения частицы. Как будут изменяться период обращения, радиус окружности и шаг винтовой линии частицы?

Примеры решения задач

1. Найдите отношение радиусов траекторий двух протонов, скорости которых направлены перпендикулярно индукции однородного магнитного поля, если кинетические энергии протонов K_1 и K_2 ?

Дано:

K_1

K_2

$\frac{R_1}{R_2} = ?$

Решение. На рисунке 72.3 магнитное поле направлено к нам. Сила Лоренца $F_{л} = q_0 v B$, действующая на протоны, максимальна, поскольку $\sin \alpha = 1$ ($\alpha = 90^\circ$) и направление перпендикулярно скорости, поэтому работу над частицей не совершает, а меняет направление скорости, сообщая частице центростремительное ускорение. Благодаря этому протоны будут двигаться по окружностям (в вакууме).

Запишем второй закон Ньютона для протонов $q_0 v_1 B = m_0 \frac{v_1^2}{R_1}$, откуда следует $R_1 = \frac{m_0 v_1}{q_0 B}$, аналогично $R_2 = \frac{m_0 v_2}{q_0 B}$, где m_0 и q_0 — соответственно, масса и заряд протона. Скорости v_1 и v_2 выразим через их кинетические энергии $K_1 = \frac{m_0 v_1^2}{2}$; $K_2 = \frac{m_0 v_2^2}{2}$ (пренебрегаем релятивистскими эффектами). Выражая скорости протонов $v_1 = \sqrt{\frac{2K_1}{m_0}}$ и $v_2 = \sqrt{\frac{2K_2}{m_0}}$ и подставляя их значения, получим: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$ (на рис. 72.3 изображен случай $|\vec{v}_1| > |\vec{v}_2|$).

2. На рисунке 72.4 изображен принцип действия простейшего масс-спектрометра, индукция магнитного поля в котором 0,1 Тл. В ионизаторе А образуются ионы, которые ускоряются напряжением 10 кВ. После поворота в магнитном поле ионы попадают на фотопластинку Ф и вызывают ее почернение. На каком расстоянии от щели будут находиться на фотопластинке полосы ионов ${}^1_1\text{H}^+$, ${}^2_1\text{H}^+$, ${}^3_1\text{H}^+$, ${}^4_2\text{H}^+$? Какой должна быть ширина щели Δl , чтобы полосы ионов ${}^{16}_8\text{O}^+$ и ${}^{15}_7\text{N}^+$ разделились?

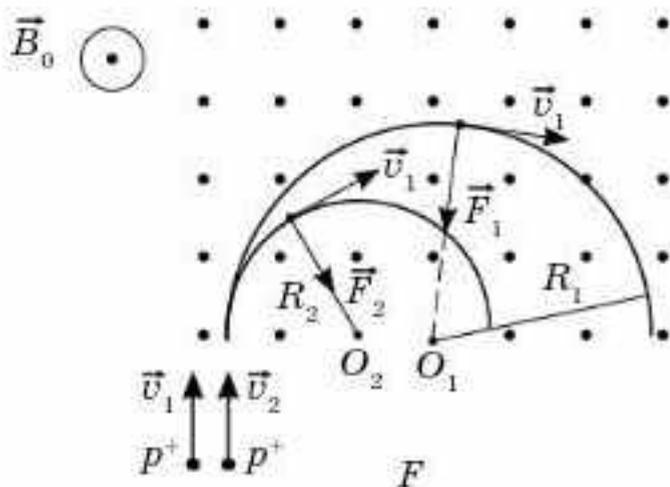


Рис. 72.3

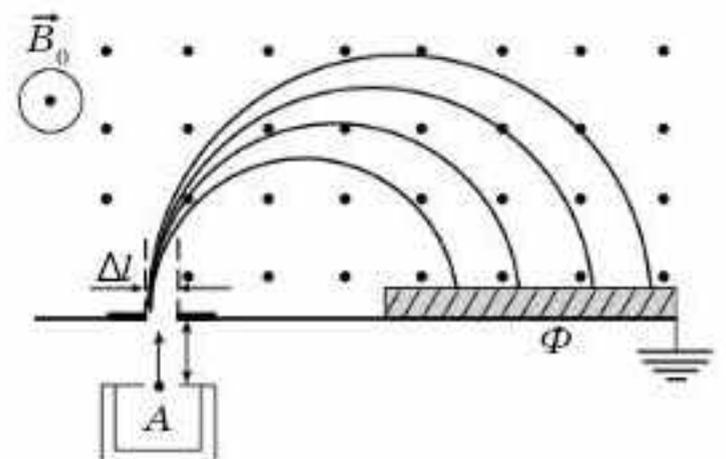


Рис. 72.4

Решение. Под воздействием высокой температуры атомы исходного вещества однократно ионизируются и ускоряются электрическим полем. Однако из-за хаотичности движения скорости ионов различны как по величине, так и по направлению. Поэтому необходимо, чтобы в щель Δl ионы попали, имея одинаковую скорость и по величине, и по направлению. Поэтому между ионизатором A и щелью Δl необходимо поместить устройство, через которое прошли бы только те ионы, которые имеют строго одинаковую скорость.

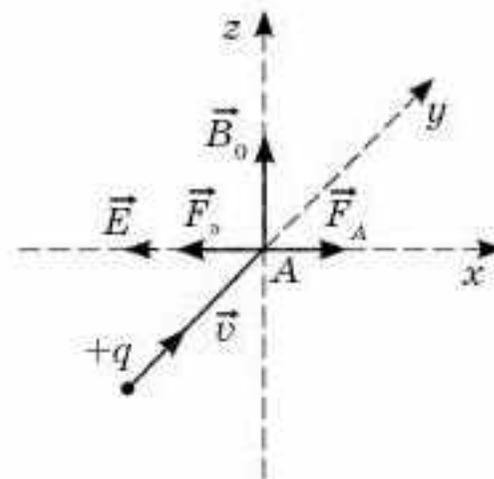


Рис. 72.5

Между ионизатором A и щелью Δl создаются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля (рис. 72.5). На положительный ион будут действовать силы со стороны как электрического поля, так и магнитного. При равенстве сил $q_0 E = q_0 B_0 v$ прямолинейно будут двигаться только те ионы, которые имеют скорость $v = \frac{E}{B_0}$. Другие ионы отклонятся от этого направления и не попадут в щель Δl , так что в поле B_0 попадут ионы, имеющие скорости, равные по величине и направлению. Именно поэтому все ионы будут двигаться по окружности радиусом $R = \frac{m_0 v}{q_0 B_0}$ (см. предыдущую задачу), и на фотопластинке Φ образуется полоска такой же ширины, как и ширина самой щели Δl . Тогда решение задачи будет следующим.

Расстояние от щели до полоски на фотопластинке будет равно $2R$, т. е. диаметру окружности.

1. Для ионов ${}_1\text{H}^+$ (это протон) $l_1 = 2 \cdot \frac{m_0 v}{q_0 B_0}$, скорость v определим по ускоряющей разности потенциалов $\Delta\phi = 10$ кВ: $q_0 \Delta\phi = \frac{m_0 v^2}{2}$; $v = \sqrt{\frac{2q_0 \Delta\phi}{m_0}}$. Тогда $l_1 = 2 \cdot \frac{m_0}{q_0 B_0} \cdot \sqrt{\frac{2q_0 \Delta\phi}{m_0}}$, или $l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{m_0}{q_0} \Delta\phi}$.

Отношение $\frac{q_0}{m_0}$ носит название *удельный заряд частицы*. Для протона оно равно: $\gamma = \frac{q_0}{m_0} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 0,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$. Окончательно

имеем: $l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{\Delta\phi}{\gamma}}$; $l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{0,1 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{10^4 \text{ В}}{0,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}}} = 0,29 \text{ м}$.

2. Для ионов ${}_1^2\text{H}^+$ (ядра дейтерия) изотопов водорода, масса которых в два раза больше массы протона, т. е. $l_2 = \sqrt{2} l_1 = 0,4 \text{ м}$.

3. Для ионов ${}^3_1\text{H}^+$ (ядра трития) — сверхтяжелый водород — масса ядер которых в три раза больше массы протона, т. е. $l_3 = \sqrt{3} l_1 = 0,5$ м.

4. Для ядер гелия ${}^4_2\text{He}^+$ (α -частица), масса которых в четыре раза больше массы протона, а заряд больше в два раза, $l_4 = \sqrt{2} l_1 = 0,4$ м.

Чтобы ответить на вопрос, при какой ширине щели Δl полосы ионов ${}^{16}_8\text{O}^+$ и ${}^{15}_7\text{N}^+$ на фотопластинке разделились, необходимо “потребовать”, чтобы расстояние между серединами полос (они имеют такую же ширину, что и ширина щели Δl) было чуть больше Δl , чтобы между ними был зазор. Тогда

$$l({}_8\text{O}) - l({}_7\text{N}) = \frac{2\sqrt{3}}{B_0} \sqrt{\frac{m_0 \Delta \varphi}{q_0}} - \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{m_N \Delta \varphi}{q_0}} \geq \Delta l,$$

где m_N — масса ядра азота (без учета масс шести оставшихся электронов); m_0 — масса ядра кислорода (без учета масс семи оставшихся электронов). Масса m_N в 15 раз больше массы протона, т. е. $l_N = \sqrt{15} \cdot 0,29$ м; для кислорода m_0 — в 16 раз больше массы протона, т. е. $l_0 = 4 \cdot 0,29$ м, т. е. $\Delta l > 0,037$ м. (Анализируя полученные результаты данной задачи, ответьте на вопрос: “Изотопы каких элементов легче “рассортировать” — легких или тяжелых?”.)

3. Циклотрон. Вопрос о строении вещества давно интересовал человечество. Еще 2500 лет назад Демокрит высказал гипотезу о том, что тела состоят из мельчайших неделимых частиц — атомов. Однако современная физика, как вы знаете, утверждает, что атом — сложное образование. Используя α -частицы (ядра атомов гелия, испускаемые радиоактивным радием), в качестве снаряда для бомбардировки различных химических элементов, выдающийся английский физик Эрнест Резерфорд (1871—1937) открыл атомное ядро. Им же была осуществлена извечная мечта алхимиков — получение благородных металлов (золота) из обычных материалов (железа). Бомбардируя α -частицами ядра азота, он впервые в истории человечества в 1919 г. осуществил *искусственную ядерную реакцию*, в которой из ядер азота получил ядра кислорода. В принципе, таким образом можно получить и ядра золота, и вообще ядра всех существующих элементов, и даже тех, которых в природе нет. Однако кинетическая энергия α -частиц, испускаемых радием, относительно мала, она составляет всего 5—6 МэВ. Для осуществления ядерных реакций необходимы частицы с энергией гораздо большей, чем 5 МэВ. Чтобы сообщить им такую энергию, создаются различные типы ускорителей заряженных частиц. Наиболее удачную машину для этих целей — *циклотрон* — изобрел в 1930 г. американский физик Э. Лоуренс (1901—1958).

Главная часть циклотрона — две полые плоские металлические коробки, называемые *дуантами*. Дуанты немного отходят по диаметру

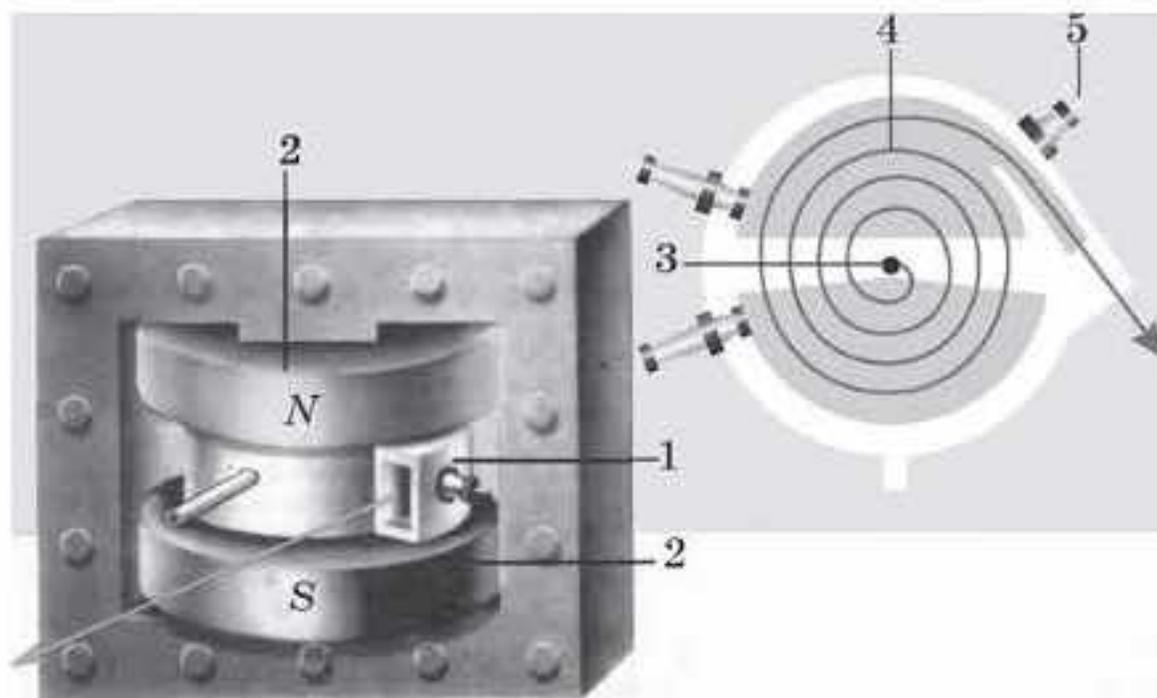


Рис. 72.6. Циклотрон:

1 — вакуумный ускоритель; 2 — постоянный магнит; 3 — источник частиц; 4 — траектория частицы в циклотроне; 5 — электроды для подачи ускоряющего напряжения

друг от друга и подключены к высокочастотному генератору (рис. 72.6). Это напоминает разрезанную пополам консервную банку, половинки которой чуть-чуть раздвинуты. Дуанты помещены в эвакуированное вакуумное пространство между полюсами мощного электромагнита, который создает магнитное поле с индукцией до нескольких тесла. В центре устройства помещен источник ионов (или частиц, электронов и т. д.), которые необходимо ускорить. Частица вылетает из источника с некоторой скоростью v_0 и влетает внутрь дуанта. Магнитное поле действует на частицу с силой Лоренца $F_{\text{л}} = q_0 v_0 B$, которая перпендикулярна скорости и заставляет частицу разворачиваться, сообщая ей центростремительное ускорение, и двигаться по полуокружности

радиусом $r_0 = \frac{mv_0}{q_0 B}$.

За время движения частицы внутри устройства полярность на дуантах должна измениться, и электрическое поле, существующее в зазоре между дуантом (внутри дуантов электрическое поле отсутствует, так как коробки металлические), совершает над частицей работу $A = q_0 \Delta\phi$, где $\Delta\phi$ — разность потенциалов между дуантами. Частица получает толчок, и во второй дуант она попадает ускоренной, т. е. движется с большей скоростью и по траектории большего радиуса: $r = \frac{mv}{q_0 B}$. Траектория частицы внутри дуантов образует раскручивающуюся спираль. Таким образом каждый раз, проходя зазор между дуантами, частица получает очередной толчок со стороны электрического поля, создаваемого высокочастотным генератором, в результате чего ее энергия увеличивается. Затем она выводится из циклотрона и направляется на мишень. Весь вопрос заключается в том, как согласовать (синхронизировать) частоту

ту генератора с частотой вращения частицы таким образом, чтобы, выходя очередной раз из одного дуанта, она попадала в ускоряющее электрическое поле. Что интересно: эта согласованность осуществляется автоматически! Действительно, выразим период вращения частицы

по окружности радиусом r : $T = \frac{2\pi r}{v}$. Подставляя значение радиуса

$r = \frac{mv}{q_0 B}$, имеем: $T = \frac{2\pi m}{q_0 B}$, т. е. *период вращения частицы не зависит от радиуса!* Частота, на которой должен работать генератор, определяется

выражением $\nu = \frac{q_0 B}{2\pi m}$. Она не зависит ни от радиуса, ни от значения скорости частицы. Максимальная кинетическая энергия частицы, когда она покидает циклотрон, равна $W_{\text{к}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$.

Выражая из формулы $R_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}}{q_0 B}$ скорость частицы: $v_{\text{max}} = R_{\text{max}} \frac{q_0 B}{m}$

и подставляя в формулу для кинетической энергии, получим:

$W_{\text{к}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_0^2}{m} B^2 R_{\text{max}}^2$, где R_{max} — радиус дуантов.

4. В однородном магнитном поле с индукцией B движется со скоростью v частица массой m с зарядом q , причем угол между векторами \vec{B} и \vec{v} равен α . Найдите радиус и шаг спирали, по которой движется частица.

Дано:

B, v

α, m

$R - ? h - ?$

Решение. Разложим скорость частицы на две составляющие (рис. 72.7). Для определенности будем считать, что заряд частицы — положительная величина. Воспользуемся принципом независимости движения.

Рассмотрим вначале движение частицы по оси Oy . На частицу действует сила Лоренца, меняющая скорость частицы по направлению

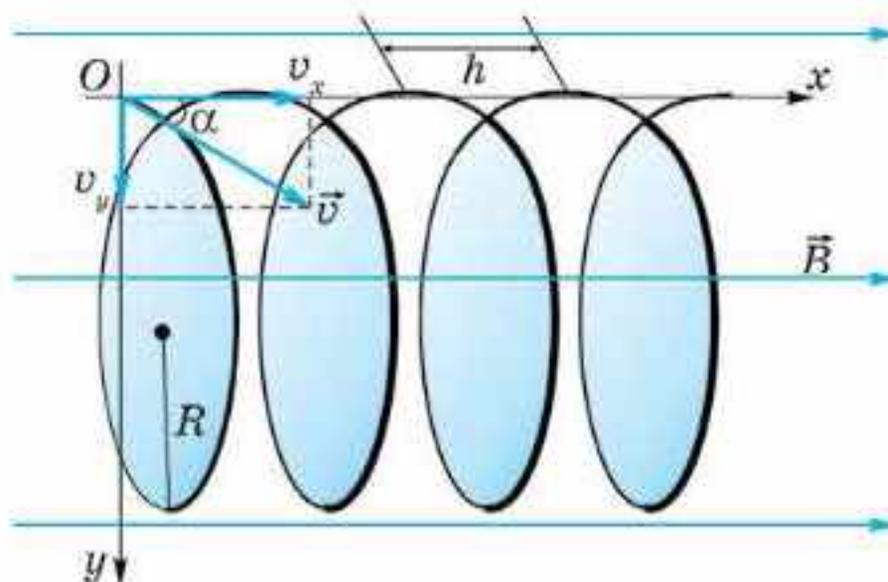


Рис. 72.7

и сообщая ей центростремительное ускорение. Для движения по оси Oy угол α между v_y и B равен 90° , поэтому, используя второй закон Ньютона $q_0 v_y B = m \frac{v_y^2}{R}$, получим $v_y = \frac{q_0 BR}{m}$; период обращения по окружности радиусом R будет равен $T = \frac{2\pi R}{v_y}$; т. е., как и ранее, период не зависит от радиуса и скорости частицы. Сам же радиус орбиты частицы в магнитном поле равен $R = \frac{mv_y}{Bq_0} = \frac{mv \sin \alpha}{Bq_0}$.

По оси Ox угол между v_x и B равен нулю, т. е. $\sin 0^\circ = 0$, сила Лоренца равна нулю, поэтому движение частицы вдоль оси Ox будет равномерным и прямолинейным. В результате независимого сложения обоих движений имеем движение по спирали радиусом R , ось которой параллельна индукции магнитного поля. Шаг спирали h определяется величиной смещения частицы вдоль оси спирали за время полного оборота частицы, т. е. $h = v_x T = v \cos \alpha \frac{2\pi m}{q_0 B} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{q_0 B}$.

Творческая мастерская

Объясните

1. Протон влетает в однородное магнитное поле I индукцией B под некоторым острым углом к линиям магнитной индукции. Почему он будет двигаться по спирали?

2. Положительно заряженной частице сообщили скорость в направлении бесконечного проводника с током (рис. 72.8). Как будет меняться сила, действующая на частицу?

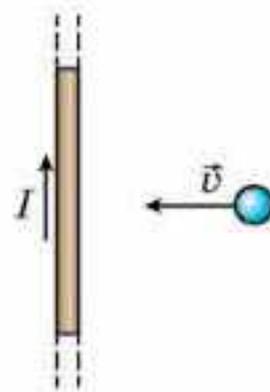


Рис. 72.8

Анализируйте

1. Электрон влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Как изменится период вращения электрона при увеличении его скорости в 3 раза?

2. На рисунке 72.9 показаны пять различных траекторий движения электрона в однородном магнитном поле. Какая траектория принадлежит электрону с наименьшей кинетической энергией.

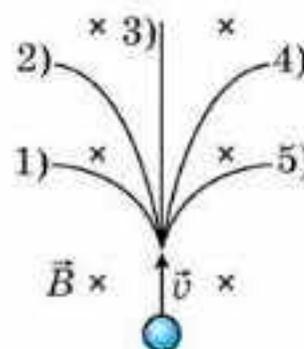


Рис. 72.9

Решайте

1. Электрон проходит ускоряющую разность потенциалов 1 кВ и влетает в однородное магнитное поле с индукцией 10 мТл под углом 30° к силовым линиям. Определите радиус спирали, по которой будет двигаться электрон.

(Ответ: 2,13 см)

2. Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 1 кВ, влетает в однородное магнитное поле с индукцией 20 мТл перпендикулярно линиям индукции. Определите радиус окружности, по которой будет двигаться протон, и его период обращения.

(Ответ: 1,5 см; 3,3 с)

3. Перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 0,1 Тл возбуждено однородное электрическое поле с напряженностью 1 кВ/м. Перпендикулярно обоим полям движется, не отклоняясь от прямолинейной траектории, заряженная частица. Определите скорость частицы.

(Ответ: 10 км/с)

4. Электрон движется в магнитном поле, индукция которого 2 мТл по винтовой линии радиусом 2 см и шагом винта 5 см. Определите скорость электрона.

(Ответ: 7,6 Мм/с)

5. Заряженные частицы, заряд которых $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл, ускоряются в циклотроне в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл и частотой ускоряющего напряжения 6 МГц. Найдите кинетическую энергию частиц в момент, когда они движутся по радиусу 2 м.

(Ответ: 2,4 пДж)

6. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 10 мТл. В некоторый момент времени вектор его скорости, равный 1 Мм/с, составляет с направлением магнитного поля угол 30° . Вычислите радиус и шаг винтовой линии, по которой движется электрон.

(Ответ: $R = 0,28$ мм; $h = 3,1$ мм)

7. Электрон движется в вакууме со скоростью 3 Мм/с в однородном магнитном поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$. Чему равна сила, действующая на электрон, если угол между направлением скорости электрона и линиями индукции 90° ?

(Ответ: $4,8 \cdot 10^{-14} \text{ Н}$)

*8. Небольшое тело массой $m = 20 \text{ г}$ и зарядом $q = 1 \text{ мкКл}$ подвешено на невесомой диэлектрической нити длиной $l = 50 \text{ см}$ и помещено в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$, силовые линии которого перпендикулярны силе тяжести. Тело отклонили на натянутой нити от положения равновесия до высоты $h = 10 \text{ см}$ в плоскости, перпендикулярной (рис. 72.10), и опустили без начальной скорости. Найдите силу натяжения нити при движении тела, когда оно проходит положение равновесия.

(Ответ: $0,27 \text{ Н}$)

*9. Для определения отношения заряда электрона к его массе пучок электронов разгоняют между катодом и анодом электронно-лучевой трубки. При вылете из трубки электроны попадают в область однородного магнитного поля с индукцией $0,5 \text{ мТл}$, силовые линии которого перпендикулярны скорости пучка. При этом световое пятно на экране, находящемся за анодом, смещается на $7,5 \text{ мм}$ (относительно положения, когда магнитное поле отсутствует). Определите

отношение $\frac{|e|}{m}$, если напряжение между анодом и катодом трубки 10 кВ , а расстояние между анодом и экраном 10 см .

(Ответ: $1,8 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$)

■10. Небольшой шарик массой $m = 10 \text{ г}$ и зарядом $q = 1 \text{ мкКл}$ вращается в горизонтальной плоскости на невесомой диэлектрической нити длиной $l = 50 \text{ см}$. В пространстве создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$, силовые линии которого направлены вдоль силы тяжести вниз (рис. 72.11). При движении нить образует с вертикалью угол $\alpha = 30^\circ$. Найдите период обращения шарика.

(Ответ: $1,31 \text{ с}$)

*11. Шарик массой $m = 10 \text{ г}$ и зарядом $q = 1 \text{ мкКл}$ подвешен на невесомой шелковой нити длиной $l = 50 \text{ см}$ и помещен в однородное горизонтальное магнитное поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$. Когда шарик находится в положении равновесия, ему сообщают скорость v_0 , направленную перпендикулярно (рис. 72.12). При каких значениях скорости v_0 шарик совершит полный оборот вокруг точки подвеса?

(Ответ: $v_0 \geq 5 \text{ м/с}$)

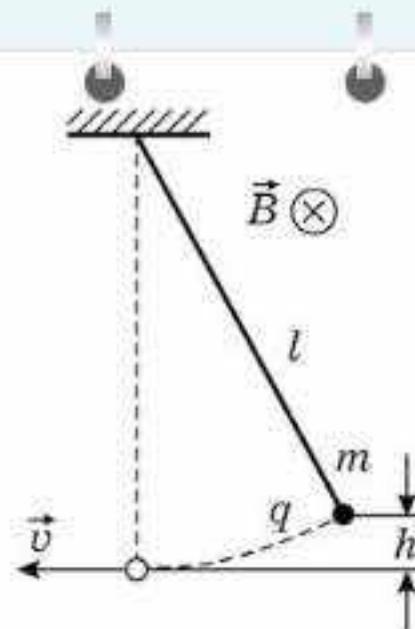


Рис. 72.10

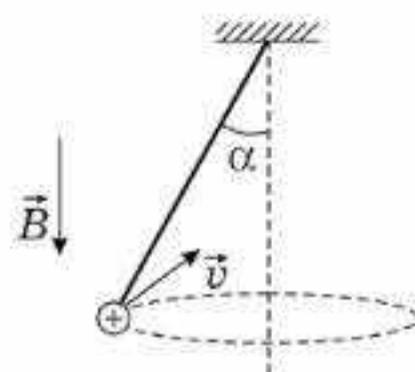


Рис. 72.11

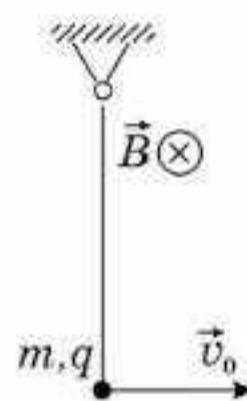


Рис. 72.12



Рефлексия

1. Урок навел на размышления...
2. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
3. Какие приобретенные на этом уроке знания пригодятся вам в дальнейшей жизни?
4. Что нового вы узнали на уроке?

§ 73. Магнитное поле в веществе



Ключевые понятия: магнитная проницаемость, диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, петля гистерезиса, домены.

На этом уроке вы: научитесь классифицировать вещества по их магнитным свойствам и определять сферы их применения; анализировать современные области применения магнитных материалов и обсуждать тенденции их применения.

Экспериментальные исследования показали, что все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами. Если два витка с токами поместить в какую-либо среду, то сила магнитного взаимодействия между токами изменяется. Этот опыт показывает, что индукция магнитного поля, создаваемого электрическими токами в веществе, отличается от индукции магнитного поля, создаваемого теми же токами в вакууме. *Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция B магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции B_0 магнитного поля в вакууме, называется магнитной проницаемостью:*
$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Вещества, у которых магнитная проницаемость $\neq 1$, называются магнетиками.

Магнетики во внешнем магнитном поле намагничиваются. Магнитные же свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.

Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. *Собственное магнитное поле электрона называют спиновым* (от лат. *spin* — «вращение»). Это поле создается вращением электрона вокруг своей оси. Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микротокку. Спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями, и определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

По своим магнитным свойствам вещества отличаются друг от друга. У большинства веществ эти свойства выражены слабо. *Слабо-магнитные вещества* делятся на две большие группы: *парамагнетики* (например, алюминий, платина, азот, кислород, вольфрам) и *диамагнетики* (например, медь, цинк, висмут, стекло, инертные газы, водород, органи-

ческие соединения). Они отличаются тем, что *при внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные вещества намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные вещества намагничиваются против внешнего поля.*

У парамагнетиков $\chi > 1$, а у диамагнетиков $\chi < 1$, так как

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 + \Delta B}{B_0} = 1 + \frac{\Delta B}{B_0} > 1; \quad \mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 - \Delta B}{B_0} = 1 - \frac{\Delta B}{B_0} < 1.$$

Здесь B_0 — магнитная индукция внешнего магнитного поля в вакууме; B — магнитная индукция внешнего магнитного поля в веществе; ΔB — магнитная индукция намагниченного тела.

Отличий от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия $\chi = 1,000\,023$, у кислорода $\chi = 1,000\,002$, у вольфрама $\chi = 1,000\,176$, у меди $\chi = 0,999\,990$, у воды $\chi = 0,999\,991$, у висмута $\chi = 0,999\,824$. Образцы из парамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, втягиваются в область сильного поля (рис. 73.1), а образцы из диамагнетика — выталкиваются из него (рис. 73.2).

Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным **против** индукции внешнего поля.

В атомах парамагнитных веществ магнитные поля электронов скомпенсированы не полностью, и атом оказывается подобным маленькому круговому току с собственным магнитным полем. В отсутствие внешнего поля эти круговые микротоки располагаются произвольно, поэтому суммарная магнитная индукция равна нулю. Внешнее магнитное поле

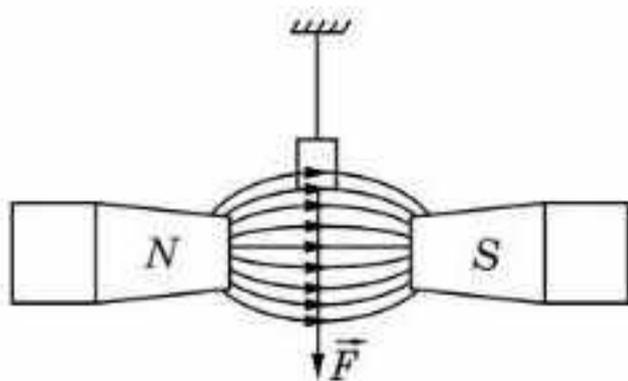


Рис. 73.1

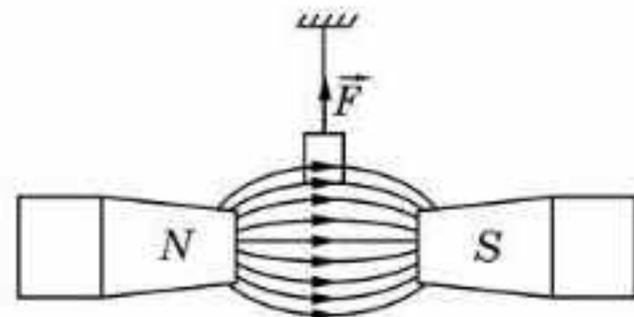


Рис. 73.2

оказывает ориентирующее действие на микротоки, которые стремятся сориентироваться так, чтобы их собственные магнитные поля оказались направленными по индукции внешнего поля. Но из-за теплового движения атомов ориентация микротоков никогда не бывает полной. С ростом внешнего магнитного поля ориентационный эффект возрастает, поэтому индукция собственного магнитного поля парамагнетика растет прямо пропорционально индукции внешнего магнитного поля. Полная индукция магнитного поля в парамагнетике складывается из индукции внешнего магнитного поля и индукции собственного магнитного поля, возникшего в процессе намагничивания. Механизм намагничивания парамагнетиков очень похож на механизм поляризации полярных диэлектриков. Диамагнетизм же не имеет аналога среди электрических свойств вещества.

Следует отметить, что диамагнитными свойствами обладают атомы любых веществ. Однако во многих случаях диамагнетизм атомов маскируется более сильным парамагнитным эффектом. Явление диамагнетизма было открыто М. Фарадеем (1845 г.).

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле, называются ферромагнетиками. Их магнитная проницаемость лежит в пределах $10^2 - 10^5$. Например, у стали $\infty = 8000$, у сплава железа с никелем $\infty = 250\ 000$.

К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа получила название *ферромагнетиков*.

Ферромагнитными свойствами обладают различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы — *ферриты*.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая *температура (точка) Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. Температура Кюри железа равна 770°C , кобальта — 1130°C , никеля — 360°C .

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы — *магнитомягкие* и *магнитожесткие*. Магнитомягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле исчезает. К ним относятся, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, т. е. магнитное поле постоянно изменяет свое направление (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнитожесткие материалы сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнитожестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнитожесткие материалы используются в основном для изготовления постоянных магнитов.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков *не является постоянной величиной*; она сильно зависит от индукции внешнего поля B_0 . Типичная зависимость $\mu(B_0)$ приведена на рисунке 73.3. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от индукции B_0 внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является *магнитный гистерезис* (*гистерезис* означает “запаздывание”), т. е. зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания $B(B_0)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 73.4).

Из рисунка 73.4 видно, что при $|B_0| > B_{0c}$ наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать магнитную индукцию B_0 внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность, а поле внутри образца будет равно B_r .

Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию B_0 до значения B_{0c} , которое принято называть *коэрцитивной силой*. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рисунке 73.4.

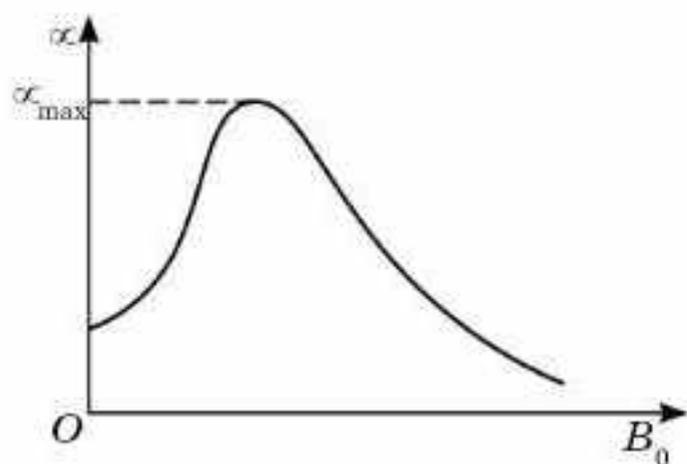


Рис. 73.3

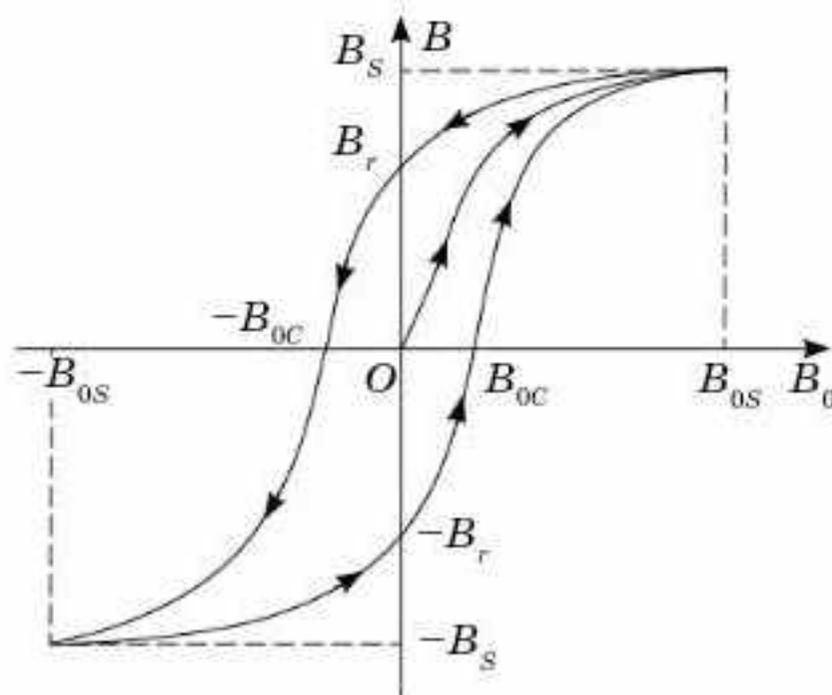


Рис. 73.4

У магнитомягких материалов значение коэрцитивной силы B_{oc} невелико — петля гистерезиса таких материалов достаточно узкая. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, т. е. имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к магнито жестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-3} — 10^{-1}$ мм. Эти области называются *доменами*. Каждый домен представляет собой небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные поля в различных доменах ориентированы в ферромагнетике беспорядочно. Поэтому ферромагнетик окажется ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля B_0 происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены и наступает магнитное насыщение. Качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца может служить рисунок 73.5.

После того как ферромагнетик извлекут из магнитного поля, большинство доменов сохраняют приобретенную ориентацию, и поэтому ферромагнетик останется намагниченным. Убрать намагниченность можно механическим воздействием или нагреванием до температуры Кюри (так как при этом домены ориентируются хаотически).

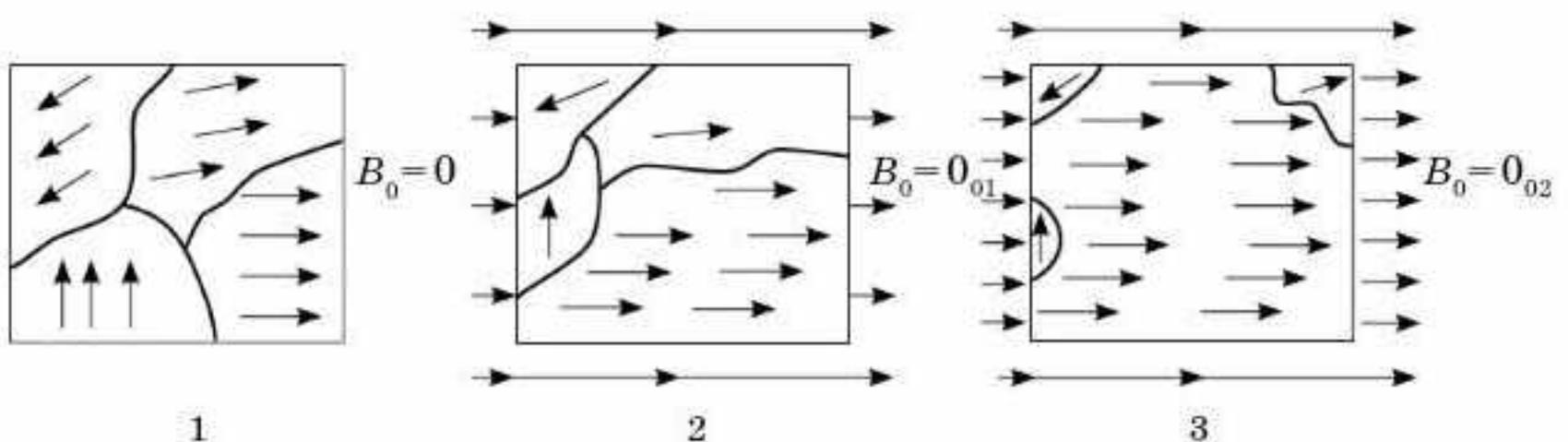


Рис. 73.5

На проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила Ампера, которая перемещая его, совершает работу. Рассмотрим следующие примеры.

Пример 1. Проводник длиной 20 см с силой тока 50 А находится в однородном магнитном поле с индукцией 40 мТл. Какую работу совершит источник тока, если проводник переместится на 10 см перпендикулярно вектору магнитной индукции (вектор магнитной индукции перпендикулярен направлению тока в проводнике).

Величина работы совершаемой силой Ампера равна:

$$A = F\Delta x = BIl\sin\alpha \cdot \Delta x = BIl\Delta x.$$

Подставив численные значения и произведя вычисления, получим, что работа, совершенная в этом случае, равна $A = 40$ мДж.

Пример 2. Проводник длиной 0,15 м перпендикулярен вектору магнитной индукции однородного магнитного поля, модуль которого $B = 0,4$ Тл. Сила тока в проводнике равна 8 А. Найдите работу, которая была совершена при перемещении проводника на 2,5 см по направлению действия силы Ампера.

Величина работы, совершаемой силой Ампера, равна:

$$A = F\Delta x = BIl\sin\alpha \cdot \Delta x = BIl\Delta x.$$

Подставив численные значения и произведя вычисления, получим, что работа совершенная в этом случае равна $A = 12$ мДж.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества называются *магнетиками*?
2. Каков физический смысл *магнитной проницаемости вещества*?
3. Какие вещества называются *парамагнетиками*?
4. За какие свойства вещества называются *диамагнетиками*?
5. Какие вещества называются *ферромагнетиками*?
6. Что называют *точкой Кюри*?
7. Как объяснить природу ферромагнетизма?



Рефлексия

1. Урок навел на размышления...
2. Что на вас произвело наибольшее впечатление?
3. Какие приобретенные на этом уроке знания пригодятся вам в дальнейшей жизни?
4. Что нового вы узнали на уроке?

Вокруг проводников с током и движущихся заряженных частиц существует *магнитное поле* — особый, непрерывный в пространстве вид материи, передающий магнитные взаимодействия. Магнитное поле в отличие от электростатического носит вихревой (замкнутый) характер. Направление магнитного поля находят по правилу обхвата правой рукой: если большой палец правой руки направить по направлению тока в проводнике, то остальные четыре пальца, охватывающие проводник, покажут направление магнитного поля (его силовых линий). Существует еще одно правило, позволяющее определять направление силовых линий магнитного поля, — *правило буравчика*: если штопор буравчика расположить по направлению тока, то вращение его рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля.

Магнитное поле характеризуют *вектором магнитной индукции*: $B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$. Измеряется вектор магнитной индукции в теслах:

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}.$$

Для более полной характеристики магнитного поля ввели еще одну величину — *поток вектора магнитной индукции*, или *магнитный поток* $\Phi = BS \cos \alpha$. Единицей измерения магнитного потока в СИ является *вебер*:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

На проводник с током со стороны магнитного поля действует сила Ампера:

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha.$$

На рамку с током в магнитном поле действует момент сил Ампера, вращающий рамку: $M_{\max} = B I S$.

На заряженную частицу со стороны магнитного поля действует сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = B q v \sin \alpha.$$

Магнитное поле в веществе изменяется. Вещества, изменяющие магнитное поле, называются *магнетиками*. Различают *диамагнетики* (они уменьшают внешнее магнитное поле), *парамагнетики* (они усиливают внешнее магнитное поле) и *ферромагнетики* (они многократно усиливают внешнее магнитное поле).

Ферромагнетики широко используются благодаря своим уникальным свойствам.



Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 74. Закон электромагнитной индукции



Ключевые понятия: электромагнитная индукция, индукционный ток, ЭДС индукции, закон электромагнитной индукции.

На этом уроке вы: узнаете, кем и как было открыто явление электромагнитной индукции; выясните сущность этого явления; ознакомитесь с опытами Фарадея и узнаете, как возникает и от чего зависит ЭДС индукции в контуре.

Предпосылки открытия явления электромагнитной индукции. Открытие Эрстедом магнитного поля вокруг проводника с током в научном мире того времени вызвало широкий резонанс. Ампер, Фарадей и другие ученые начали подробное исследование магнитного взаимодействия электрических токов. Многие физики были убеждены в том, что, если ток создает вокруг себя магнитное поле, то должно существовать обратное явление — магнитное поле возбуждает в проводниках электрический ток. Обоснованием такого утверждения служил тот факт, что многие явления в природе симметричны: левое и правое, положительный и отрицательный (заряды), северный и южный (магнитные полюсы) и т. д. Итак, задача перед физиками того времени стояла предельно простая — выяснить, если ток порождает магнитное поле, то нельзя ли с помощью магнитного поля возбудить ток в контуре.

Опыты Фарадея. Английский физик М. Фарадей стал первым, кому в 1831 г. удалось экспериментально обнаружить такое явление.

Один из основных опытов Фарадея очень прост.

Вы можете воспроизвести его самостоятельно, имея в распоряжении постоянный магнит, чувствительный гальванометр, полую цилиндрическую катушку (соленоид) или просто контур, концы которого необходимо подсоединить к гальванометру. Если магнит вдвигать в контур или выдвигать из него, то можно обнаружить отклонение стрелки гальванометра, что свидетельствует о появлении тока в контуре. Возникающий в контуре ток получил название *индукционного тока*. Фарадей установил, что индукционный ток возникает в контуре только тогда, когда магнит движется относительно контура. Если же взаимное расположение магнита и контура не меняется, то тока в цепи нет.

В попытках раскрыть суть открытого им явления Фарадей провел многочисленные опыты, в ходе которых он пытался выяснить, каким же образом в контуре возникает индукционный ток и отчего может зависеть его величина. Рассмотрим некоторые факты, обнаруженные Фарадеем в ряде этих опытов.

1. Направление индукционного тока, возникающего в контуре при движении магнита в контур, противоположно направлению индук-

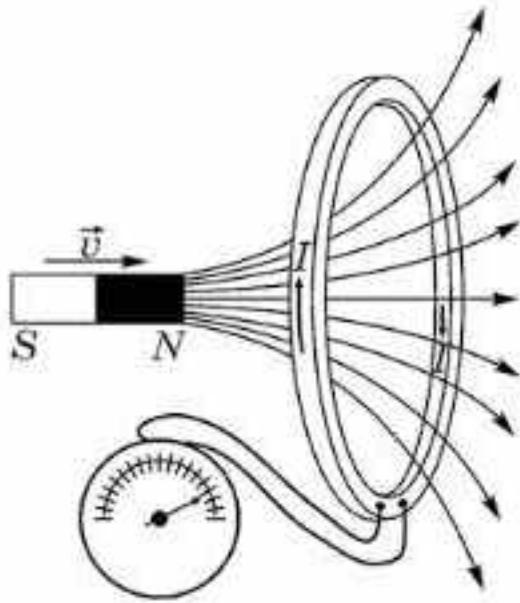


Рис. 74.1

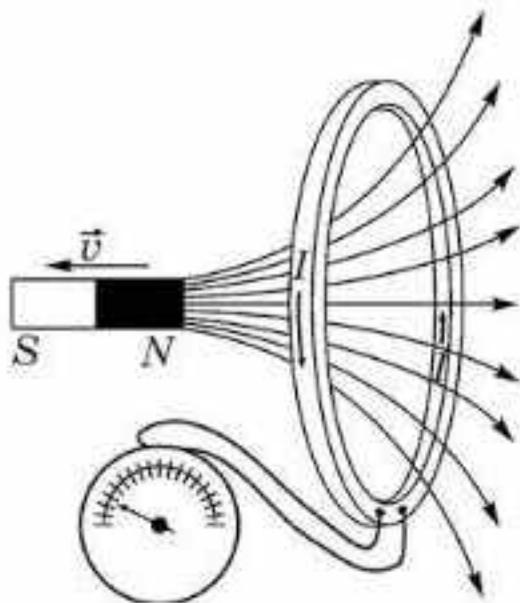
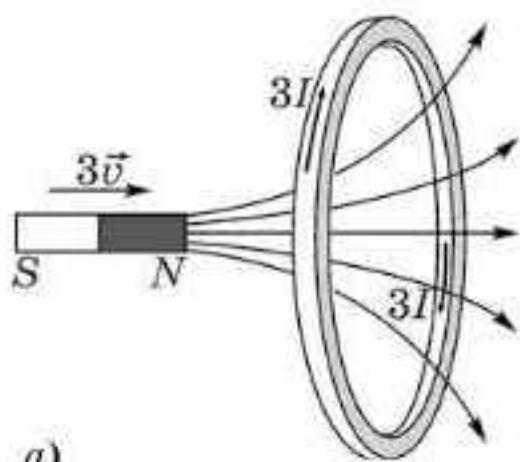
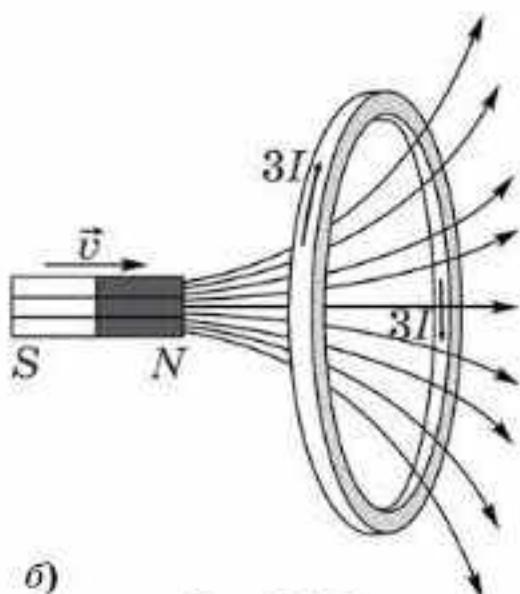


Рис. 74.2



a)



б)

Рис. 74.3

ционного тока, возникающего при его выдвигении из контура (рис. 74.1 и 74.2).

2. Отклонение стрелки гальванометра тем сильнее, чем быстрее перемещался магнит относительно контура (рис. 74.3, а).

3. Стрелка гальванометра отклоняется тем сильнее, чем большее количество полосовых магнитов используется в опыте (рис. 74.3, б).

4. Если вместо постоянного магнита взять катушку с током, то включение и выключение в ней тока также приводит к отклонению стрелки гальванометра, что свидетельствует о возникновении в контуре индукционного тока. При этом направления индукционных токов в контуре, возникающих при включении и выключении тока в катушке, противоположны друг другу (рис. 74.4).

5. Изменение площади контура из гибкого провода, расположенного в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции, приводит к появлению в контуре индукционного тока. Направление индукционного тока зависит от того, увеличивается или уменьшается площадь контура (рис. 74.5).

6. Если контур, расположенный в однородном магнитном поле, передвигать таким образом, что линии индукции магнитного поля все время остаются перпендикулярными плоскости контура, то индукционный ток в нем не возникает (рис. 74.6).

Обобщение опытов Фарадея. Из всех этих опытов можно сделать следующие выводы:

1. *Индукционный ток, а, соответственно, ЭДС индукции, возникает в контуре тогда и только тогда, когда поток вектора магнитной индукции, пронизывающий контур, меняется с течением времени, т. е. тогда, когда $\Delta\Phi \neq 0$.*

2. *Величина ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур, т. е. от $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.*

3. *ЭДС индукции возникает в контуре тогда и только тогда, когда контур пересекает линии магнитной индукции.*

ЭДС индукции. Обобщая экспериментальные данные своих опытов, Фарадей сформулировал закон электромагнитной индукции следующим образом: *ЭДС индукции, возникающая в контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром:*

$$\mathcal{E}_i \sim \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (74.1)$$

В Международной системе единиц (СИ), в которой магнитный поток Φ измеряется в веберах (Вб), коэффициент пропорциональности в формуле (74.1) является безразмерной величиной и его значение принимается равным 1. Тогда, закон электромагнитной индукции Фарадея выражается формулой:

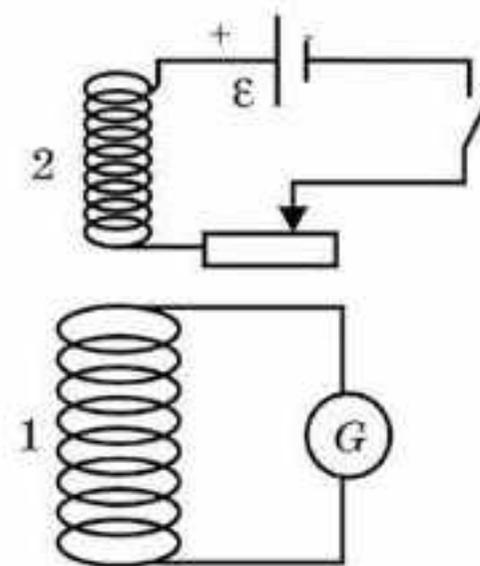


Рис. 74.4

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (74.2)$$

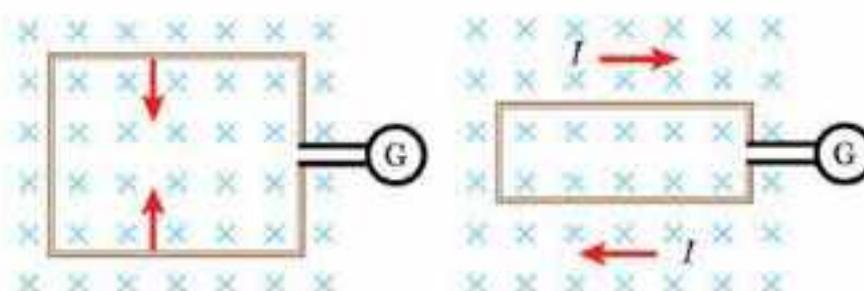


Рис. 74.5

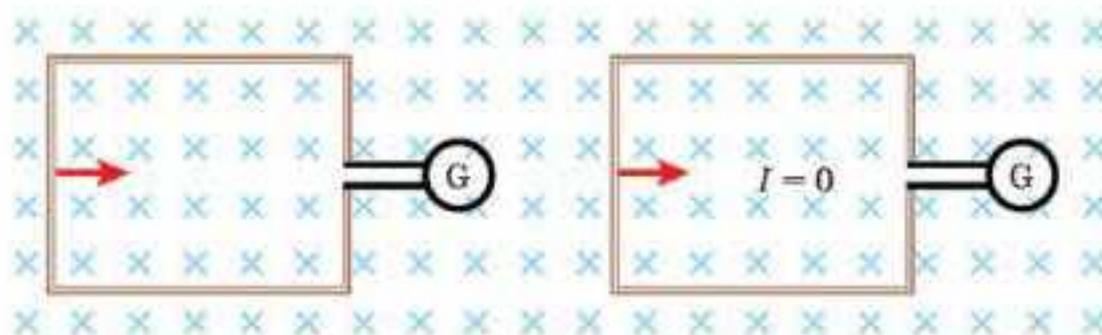


Рис. 74.6



Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Кем оно было обнаружено?
2. Приведите примеры, в которых опытным путем можно обнаружить явление электромагнитной индукции.
3. Возникнут ли ЭДС индукции и индукционный ток, если: а) вдвигать магнит в покоящийся замкнутый контур; б) надвигать замкнутый контур на неподвижный магнит? Что изменится, если контур будет разомкнутым?
4. Возникнут ли ЭДС индукции и индукционный ток, если замкнутый контур двигать параллельно магнитному полю?
5. Контур внесен в однородное магнитное поле. В каких случаях в нем будет возникать индукционный ток: а) контур движется перпендикулярно силовым линиям поля; б) контур движется поступательно под некоторым углом к полю; в) контур поворачивается в поле вокруг некоторой оси?

Творческая мастерская

Экспериментируйте

Воспроизведите опыты Фарадея, воспользовавшись катушкой, мультиметром и постоянным магнитом. Обратите внимание на факторы, оказывающие влияние на величину и направление индукционного тока.

Объясните

Магнит свободно падает внутри медной трубки вдоль ее оси. Почему для вычисления скорости его падения с высоты H нельзя пользоваться формулой $v = \sqrt{2gH}$?

Решайте

1. Сколько витков должна иметь катушка, чтобы при изменении магнитного потока внутри нее от 24 мВб до 50 мВб за 32 с в ней создалась средняя ЭДС индукции 10 В?

(Ответ: 12,3)

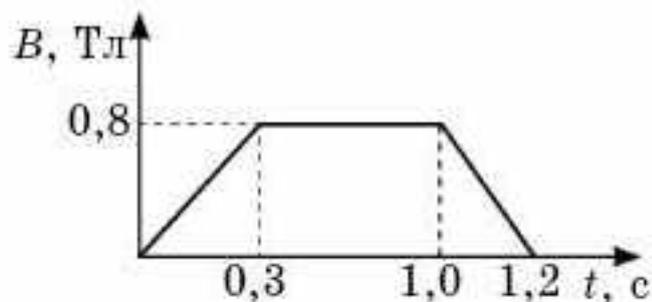


Рис. 74.7

2. Однородное магнитное поле изменяется со временем как показано на чертеже (рис. 74.7). Постройте график зависимости индукционного тока в кольце, плоскость которого расположена перпендикулярно магнитному полю. Сопротивление кольца 0,02 Ом, площадь кольца 14 см².

3. Тонкий медный провод массой 1 г согнут в виде квадрата, и концы его замкнуты. Квадрат помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл так, что плоскость его перпендикулярна линиям индукции. Определите заряд, который протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

(Ответ: 41,4 мКл)

Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?

§ 75. Правило Ленца



Ключевые понятия: магнитный поток, индукционный ток.

На этом уроке вы узнаете, от чего зависит величина индукционного тока; научитесь определять направление индукционного тока в контуре.

Магнитное поле контура с током. Как известно, линии индукции магнитного поля замкнуты, и принято считать, что они выходят из северного полюса и входят в южный. Магнитные полюсы имеются даже у тонкого плоского контура с током (рис. 75.1). При заданном направлении тока над контуром будет располагаться северный полюс, под контуром — южный.

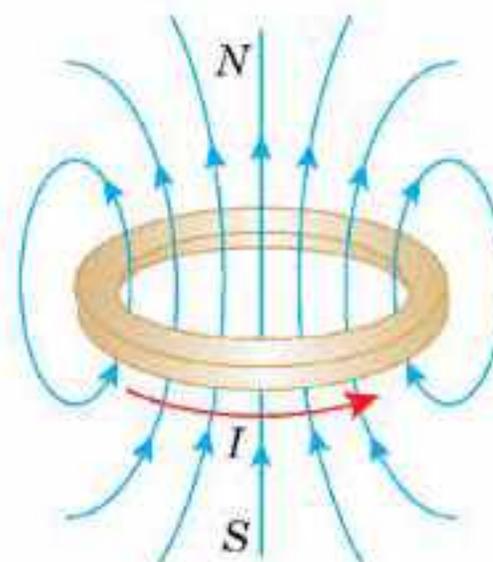


Рис. 75.1

Закон сохранения энергии и направление индукционного тока. Воспроизведем первый опыт Фарадея, расположив контур горизонтально и вдвигая в него магнит северным полюсом (рис. 75.2). Тогда за счет индукционного тока, возникающего в контуре, над ним должен появиться северный полюс. Если бы этого не произошло и над контуром появился южный полюс, то, во-первых, в контуре возник бы индукционный ток, работа которого в итоге была бы затрачена на нагревание контура. Во-вторых, при таком взаимном расположении полюсов магнита и контура с током, магнит сам втягивался бы в контур, увеличивая свою кинетическую энергию. Это приводило бы к нарушению закона сохранения энергии. Следовательно, индукционный ток в контуре должен быть направлен на рисунке 75.2 против часовой стрелки, если смотреть сверху. Если же вдвигать магнит в контур южным полюсом (рис. 75.3), то над контуром появится южный полюс, свидетельствуя о том, что индукционный ток поменял свое направление на противоположное. Из рисунков 75.2 и 75.3 видно,

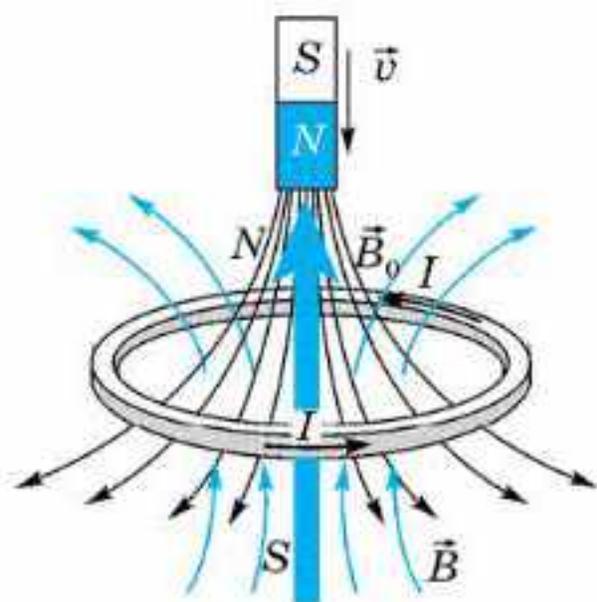


Рис. 75.2

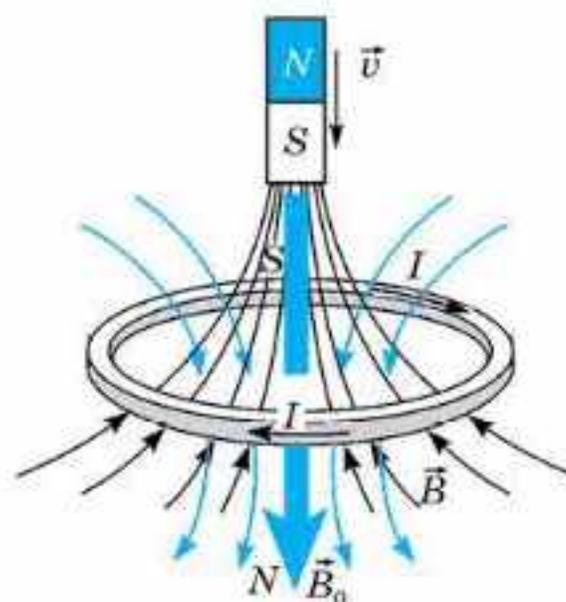


Рис. 75.3

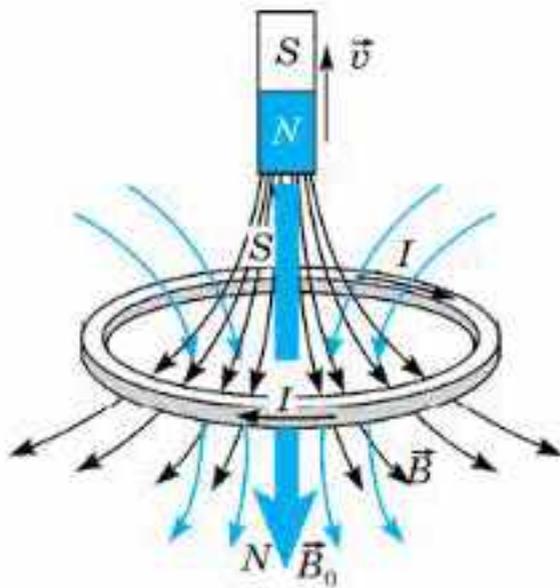


Рис. 75.4



Рис. 75.5

что в обоих случаях поток вектора индукции магнитного поля \vec{B} , создаваемый индукционным током, направлен против нарастающего поля магнита \vec{B}_0 .

Будем выдвигать магнит из контура северным полюсом. Теперь сверху над контуром должен возникнуть южный полюс (рис. 75.4). Внешняя сила будет совершать работу, преодолевая притяжение между северным полюсом магнита и южным полюсом магнитного поля индукционного тока в контуре. За счет этой работы создается индукционный ток, направленный противоположно току на рисунке 75.2.

Сопоставим рисунки 75.2 и 75.4. На первом из них поток магнитного поля, пронизывающий контур, увеличивается, т. е. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$, а поток магнитного поля индукционного тока препятствует этому увеличению. На рисунке 75.4 мы, выдвигая магнит, уменьшаем поток магнитного поля, пронизывающий контур, т. е. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$, но и здесь

магнитное поле индукционного тока препятствует изменению того магнитного потока, который вызвал индукционный ток.

Правило Ленца. Анализируя оба эти случая, мы приходим к следующей формулировке правила Ленца, определяющего направление индукционного тока.

Оно звучит так: **ЭДС индукции способствует возникновению индукционного тока такого направления, что он своим магнитным полем противодействует изменению магнитного потока, которым он вызван.** С учетом правила Ленца, закон электромагнитной индукции Фарадея записывается в виде:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (75.1)$$

Правило Ленца можно продемонстрировать с помощью легкого алюминиевого кольца, закрепленного на свободно вращающемся вокруг вертикальной оси стержне (рис. 75.5). Опыт показывает, что при внесении постоянного магнита кольцо от него отталкивается, а при удалении притягивается к магниту. Результат опытов не зависит от полярности магнита. Если же кольцо не замкнуто, то оно остается неподвижным.

Нам известно, что закон Ома для замкнутого контура записывается как $I = \frac{\varepsilon}{R}$, где R — сопротивление контура. В таком случае, закон электромагнитной индукции мы можем записать применительно к индукционному току:

$$I_i = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (75.2)$$

Применение правила Ленца. При определении направления индукционного тока согласно правилу Ленца нужно придерживаться следующего алгоритма:

1. Определить направление вектора магнитной индукции \vec{B}_0 (линий индукции) внешнего поля. Линии индукции поля должны пересекать рассматриваемый контур.

2. Определить, как изменяется магнитный поток (знак $\Delta\Phi$).

3. Определить направление вектора магнитной индукции \vec{B}_0 (линий индукции) поля, создаваемого индукционным током. Это поле должно быть направлено противоположно внешнему магнитному полю \vec{B}_0 , если $\Delta\Phi > 0$, и иметь одинаковое с ним направление, если $\Delta\Phi < 0$.

4. По известному направлению магнитного поля \vec{B} , определить направление индукционного тока, пользуясь правилом правого винта.



Вопросы для самоконтроля

1. Объясните причину возникновения индукционного тока в замкнутом контуре при введении в него прямого магнита.
2. Как можно рассчитать величину индукционного тока, возникающего в замкнутом контуре?
3. Как соотносятся между собой потоки внешнего магнитного поля и индукционного тока?
4. Сформулируйте правило Ленца.
5. Почему можно провести аналогию между магнитным потоком и импульсом тела?

Творческая мастерская

Объясните

При приближении одного из полюсов магнита к катушке в ней возникает индукционный ток. Как, опираясь на закон сохранения энергии, можно предсказать направление индукционного тока?

Творите

1. Опишите интересные вещи, которые вы могли бы наблюдать, если бы знак изменения магнитного потока в законе электромагнитной индукции был положительным.

2. Постройте чертеж, аналогичный рисункам 75.2—75.4, для недостающего четвертого случая, когда магнит выдвигается из контура южным полюсом. Нарисуйте на чертеже линии индукций магнитного поля магнита \vec{B}_0 и магнитного поля \vec{B} , создаваемого индукционным током, а также укажите направление индукционного тока в контуре.

Решайте

1. Определите, замыкается или размыкается ключ в цепи с источником тока, для того, чтобы во второй цепи ток был направлен как на чертеже (рис. 75.6). Ответ обоснуйте.

(Ответ: замыкается)

2. Одинаковую ли работу нужно совершить для того, чтобы вставить магнит в катушку в случаях, когда ее обмотка: 1) замкнута; 2) разомкнута?

(Ответ: совершаемая работа больше в первом случае)

3. Полосовой магнит держат южным полюсом вниз над проводящим кольцом, находящимся в горизонтальной плоскости (рис. 75.7). Магнит отпускают так, что он падает сквозь кольцо. Найдите направление индукционного тока в резисторе:

а) в то время, когда магнит подлетает к кольцу;

б) в то время, когда магнит прошел сквозь кольцо и удаляется от него.

(Ответ: а) по часовой стрелке, если смотреть сверху;
б) против часовой стрелки)

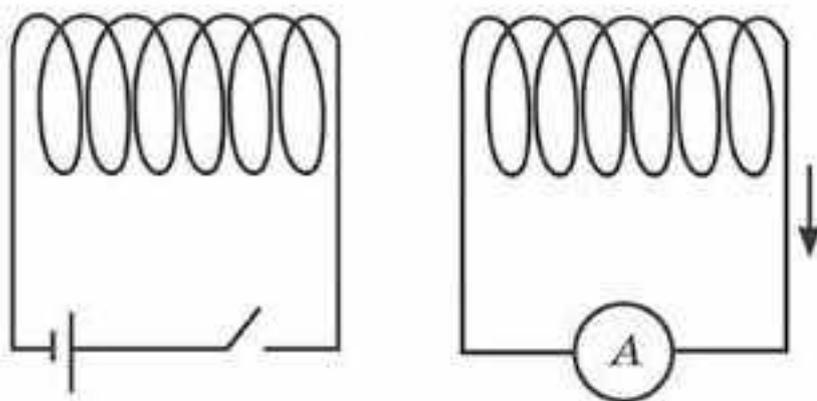


Рис. 75.6

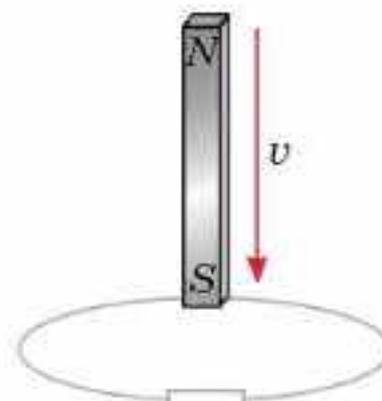


Рис. 75.7

Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?

§ 76. ЭДС индукции в движущихся проводниках



Ключевые понятия: закон сохранения энергии, электродвижущая сила индукции, сила Лоренца, закон электромагнитной индукции.

На этом уроке вы узнаете, как объясняется возникновение ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле; узнаете, как рассчитывается ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле.

В предыдущих параграфах мы описали опыты, в которых ЭДС индуцируется в неподвижном замкнутом контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле. Однако ЭДС индукции может возникать и в тех случаях, когда проводник движется в постоянном магнитном поле.

Вычисление ЭДС индукции с помощью силы Лоренца. Рассмотрим проводник длиной l (рис. 76.1), движущийся в однородном магнитном поле индукцией \vec{B} , направленной перпендикулярно плоскости рисунка (от читателя). Проводник под действием внешней силы движется с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению поля. На свободные электроны проводника со стороны магнитного поля будет действовать сила Лоренца $F_B = evB$, направленная вдоль проводника и перпендикулярная обоим векторам \vec{v} и \vec{B} . Под действием этой силы электроны начнут перемещаться в нижний конец проводника и скапливаться там, способствуя тем самым тому, что верхний конец проводника приобретет положительный заряд. В результате разделения зарядов в проводнике возникнет электрическое поле напряженностью \vec{E} . Заряды на концах проводника прекратят накапливаться лишь тогда, когда сила Лоренца $F_B = evB$, направленная вниз, не сравняется с электрической силой $F_E = eE$, направленной вверх. Из условия равновесия $evB = eE$ следует, что,

$$E = vB.$$

Разность потенциалов на концах проводника связана с напряженностью электрического поля в проводнике соотношением $U = El$. Следовательно, в состоянии равновесия на концах проводника установится разность потенциалов, равна $U = El = Bvl$. При установлении равновесия эта разность потенциалов нейтрализует ЭДС индукции, так как $U = -\mathcal{E}_i$. Следовательно, для ЭДС индукции в движущемся проводнике, можем записать:

$$\mathcal{E}_i = -Bvl. \quad (76.1)$$

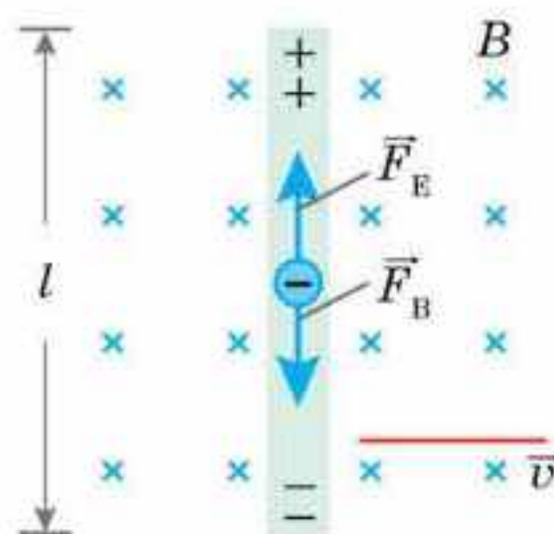


Рис. 76.1

Мы рассмотрели случай, когда проводник движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. В общем случае, ЭДС индукции, возникающей в проводнике, движущемся в магнитном поле в произвольном направлении, определяется по формуле:

$$|\mathcal{E}_i| = Blv \sin a, \tag{76.2}$$

где a — угол между направлением вектора скорости \vec{v} и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Таким образом, *все время, пока проводник будет продолжать двигаться в однородном магнитном поле, на его концах будет поддерживаться разность потенциалов.*

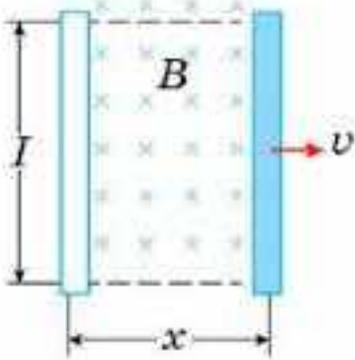


Рис. 76.2

Вычисление ЭДС индукции с помощью закона электромагнитной индукции. Получим выражение для ЭДС индукции в проводнике длиной l , движущемся в однородном магнитном поле, используя закон электромагнитной индукции. Так как lx есть площадь контура (рис. 76.2), описываемая проводником, где x — координата стержня в произвольный момент времени, то магнитный поток, пронизывающий этот контур, выражается формулой:

$$\Phi = Blx.$$

Воспользовавшись законом Фарадея $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, и принимая во внимание, что при равномерном движении стержня $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$, получим для ЭДС индукции в движущемся стержне формулу:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(Blx)}{\Delta t} = -Bl\frac{\Delta x}{\Delta t} = -Blv. \tag{76.3}$$

Сравнивая выражения (76.1) и (76.3), видим, что оба способа вычисления ЭДС индукции приводят к одному и тому же результату. Следовательно, мы можем описывать ЭДС индукции в движущихся проводниках, применяя как силу Лоренца, так и закон электромагнитной индукции Фарадея.

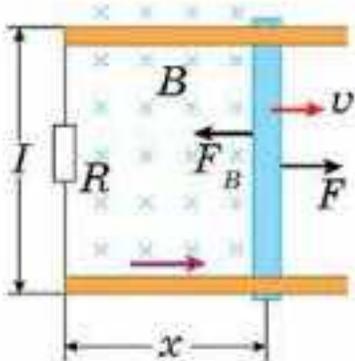


Рис. 76.3

Работа силы по перемещению проводника в магнитном поле. Рассмотрим теперь случай, когда движущийся проводник является частью проводящего контура. Рассмотрим цепь, состоящую из движущегося проводящего стержня длиной l по двум параллельным закрепленным проводящим рельсам (рис. 76.3). Сопротивлением стержня пренебрежем, а сопротивление неподвижной части цепи представим в виде резистора

сопротивлением R . Однородное магнитное поле индукцией \vec{B} направим перпендикулярно плоскости рисунка. При движении стержня со скоростью \vec{v} под действием внешней силы \vec{F} , на свободные электроны стержня будет действовать сила Лоренца, направленная вдоль стержня вниз. Направленное движение свободных электронов создает ток в замкнутом контуре. Это и есть индукционный ток, создаваемый ЭДС индукции в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле.

На стержень, вдоль которого течет индукционный ток, со стороны магнитного поля будет действовать сила Ампера. На рисунке эта сила обозначена \vec{F}_B и направлена противоположно внешней силе \vec{F} . Если эти две силы будут равны по величине, то стержень будет двигаться равномерно, и работа внешней силы будет переходить во внутреннюю энергию резистора R .

Рассчитаем работу внешней силы по перемещению стержня. Так как внешняя сила равна по величине силе Ампера, то $F = F_A = BIl$. При перемещении стержня на расстояние Δx внешняя сила F совершит работу:

$$A = F\Delta x = BIl\Delta x.$$

Но произведение $l\Delta x = \Delta S$ — площадь, описываемая стержнем при перемещении. Так, как $B\Delta S = \Delta\Phi$ — изменение магнитного потока сквозь площадь ΔS , то

$$A = BIl\Delta x = I\Delta\Phi, \quad (76.4)$$

Работа внешней силы по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока сквозь площадь, описываемую проводником при перемещении.

Несложно рассчитать мощность внешней силы, которая будет равна тепловой мощности, выделяемой на резисторе R :

$$P = Fv = BIlv = \frac{B^2 l^2 v^2}{R} = \frac{\mathcal{E}_i^2}{R}. \quad (76.5)$$



Вопросы для самоконтроля

1. С помощью закона сохранения энергии “откройте” закон Ома.
2. Выведите формулу для расчета ЭДС индукции, возникающей в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле.

Творческая мастерская

Объясните

Металлический лист помещен между полюсами постоянного магнита перпендикулярно линиям индукции. Требуется ли совершить положительную работу для того, чтобы вытащить лист наружу? Если да, то почему?

Творите

Придумайте устройство для измерения объемного расхода протекающей в трубопроводе проводящей жидкости, принцип действия которого основан на законе электромагнитной индукции.

Анализируйте

Как известно, сила Лоренца не совершает работы над заряженной частицей, движущейся в магнитном поле. Однако, в генераторах электрической энергии именно сила Лоренца является той сторонней силой, за счет работы которой эта энергия и производится. Возникает кажущееся противоречие. Как можно устранить это противоречие?

Решайте

1. Какова индукция магнитного поля, если в проводнике с длиной активной части 50 см, перемещающемся со скоростью 10 м/с перпендикулярно вектору индукции, возбудилась ЭДС индукции 1,5 В?

(Ответ: 0,3 Тл)

2. В вертикальном однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл поступательно движется горизонтально расположенный проводник длиной 50 см со скоростью 10 м/с так, что его скорость составляет с магнитным полем угол 30° , а с осью проводника 60° . Найдите ЭДС индукции, возникающей в проводнике.

(Ответ: 0,435 В)

3. Реактивный самолет летит горизонтально со скоростью 900 км/ч. Найдите разность потенциалов между концами его крыльев, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли равна 50 мкТл. Размах крыльев 24 м. Чему равна разность потенциалов, возникающая при этом между носом и хвостом самолета?

(Ответ: 0,3 В; 0 В)

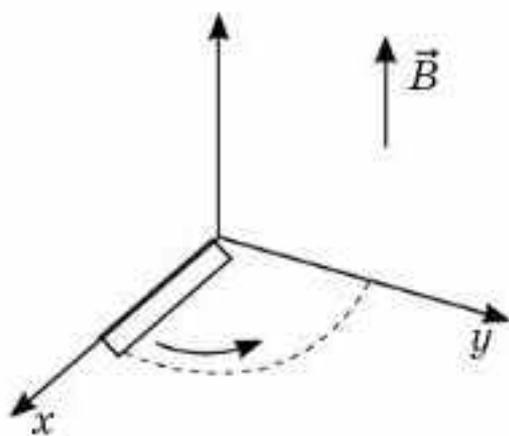


Рис. 76.4

*4. Стержень длиной l вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω вокруг одного из своих концов в магнитном поле с индукцией B и направленной перпендикулярно плоскости вращения стержня. Чему равна ЭДС индукции, возникающей в стержне (рис. 76.4)?

(Ответ: $\mathcal{E}_i = -\frac{1}{2} B\omega l^2$)

Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?

§ 77. Гипотеза Максвелла



Ключевые понятия: инерциальные системы отсчета, вихревое электрическое поле; гипотеза Максвелла, электромагнитные волны.

На этом уроке вы: узнаете, как объясняется возникновение индукционного тока в случае покоящегося проводника; узнаете смысл гипотезы Максвелла и вытекающей из нее идеи существования электромагнитных волн.

В предыдущем параграфе для объяснения явления электромагнитной индукции в случае, когда проводник двигался в постоянном магнитном поле, мы применили силу Лоренца. Но как же объяснить возникновение индукционного тока, в случае неподвижного замкнутого контура, когда сила Лоренца отсутствует? В попытках найти ответ на этот вопрос, Максвеллу удалось разглядеть совершенно новое явление природы.

Явление электромагнитной индукции и принцип относительности. Вернемся к одному из первых опытов Фарадея и попытаемся объяснить явление возникновения ЭДС индукции (индукционного тока) с позиций двух инерциальных наблюдателей (рис. 77.1) — наблюдателя K_1 , связанного с магнитом, и наблюдателем K , относительно которого контур неподвижен. Для наблюдателя K объяснить возникновение ЭДС индукции и индукционного тока в замкнутом контуре, основываясь на действии силы Лоренца, не представляется возможным, ведь магнитное поле действует только на движущиеся заряды, а свободные электроны в контуре, покоятся относительно наблюдателя K . Следовательно, сила Лоренца равна нулю. Для наблюдателя K_1 , находящегося в системе отсчета, связанной с магнитом, возникновение индукционного тока объяснить с помощью силы Лоренца можно. Относительно наблюдателя K_1 контур, а вместе с ним и электроны проводимости, надвигаются на него со скоростью \vec{v} .

Разложим вектор \vec{B} на составляющие B_x и B_y . Со стороны B_y сила Лоренца $F_{Л} = evB_y \sin \alpha = 0$, так как угол между $|\vec{v}|$ и B_y равен 180° . Со стороны B_x на электроны, находящиеся в элементе проводника Δl (рис. 77.1), действует сила Лоренца, направленная к нам. Следовательно, сила Лоренца вызовет появление тока, направленного в контуре от нас, что находится в согласии с правилом Ленца.

Возникает противоречие: принцип относительности гласит, что во всех инерциальных системах отсчета все физические процессы должны протекать одинаково. Выбранные нами системы отсчета, связан-

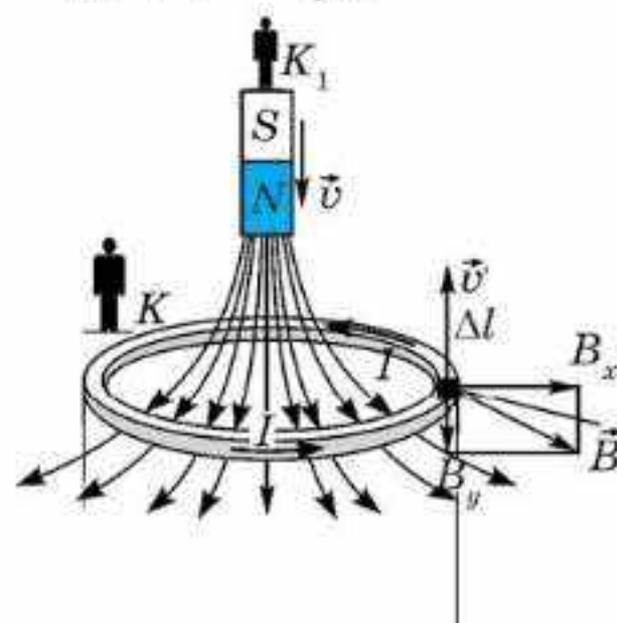


Рис. 77.1

ные с наблюдателями K и K_1 являются инерциальными, так как относительно друг друга они движутся прямолинейно и равномерно. Однако, мы не имеем права считать их равноправными, поскольку, находясь в одной из них (K_1), мы можем объяснить возникновение индукционного тока на базе наших прежних знаний, а, находясь в другой (K), мы не в состоянии этого сделать.

Для того, чтобы устранить это кажущееся противоречие, заметим, что магнитное поле, создаваемое магнитом, с точки зрения наблюдателя K не является постоянным, так как относительно него магнит меняет положение в пространстве.

Вихревое электрическое поле. Исходя из этого, Максвелл предложил следующее объяснение причины возникновения индукционного тока для наблюдателя K : *переменное магнитное поле порождает электрическое поле, которое действует на свободные электроны неподвижного проводящего контура, вызывая их направленное движение, т. е. электрический ток.* Этот ток и регистрируется наблюдателем в системе отсчета, связанной с наблюдателем K . Проволочный виток с гальванометром в опытах Фарадея служит лишь для того, чтобы по возникновению в нем индукционного тока обнаружить существование электрического поля. Электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, фундаментально отличается от кулоновского электростатического поля, порождаемого зарядами. Линии напряженности этого поля замкнуты, в отличие от силовых линий кулоновского поля, которые, как мы знаем, являются разомкнутыми — начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах. Если работа сил электростатического потенциального поля вдоль замкнутого контура равна нулю, то электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, не является потенциальным, т. е. работа сил этого поля вдоль замкнутого контура отлична от нуля. Такого рода силовые поля называются *вихревыми*. Итак, согласно Максвеллу, *вихревое электрическое поле возникает в пространстве всегда, если есть переменное магнитное поле.*

Направление линий напряженности вихревого электрического поля \vec{E} совпадает с направлением индукционного тока в реальном проволочном витке, если бы тот находился в переменном магнитном поле. Следовательно, линии напряженности возникающего электрического поля охватывают линии индукции магнитного поля и направлены при возрастании магнитной индукции ($\Delta B > 0$) так, что образуют левый винт с направлением вектора \vec{B} (рис. 77.2).

Гипотеза Максвелла. Основываясь на тесной взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями, Максвелл высказал ги-

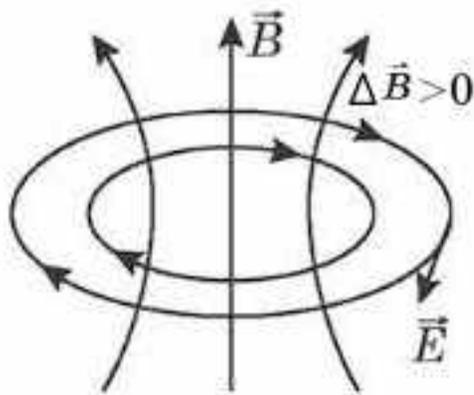


Рис. 77.2

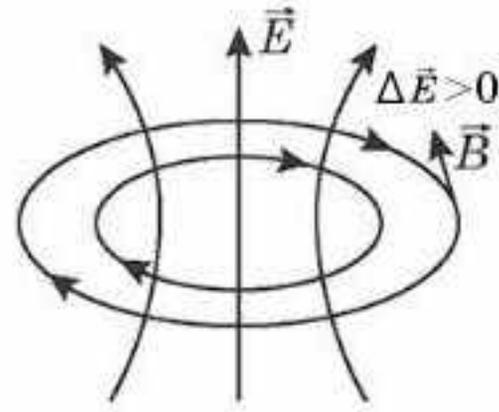


Рис. 77.3

потезу о существовании в природе процесса, обратного тому, что мы рассмотрели выше: *переменное электрическое поле порождает в пространстве магнитное поле.*

Линии индукции возникающего магнитного поля охватывают линии напряженности переменного электрического поля (рис. 77.3) и направлены так, что образуют правый винт с направлением вектора \vec{E} при возрастании напряженности электрического поля ($\Delta E > 0$).

Электромагнитные волны. Гипотеза Максвелла и созданная на ее основе единая теория электрических и магнитных явлений предсказала существование электромагнитных волн — распространяющихся в пространстве колебаний электрического и магнитного полей. Согласно уравнениям, полученным Максвеллом, скорость распространения этих волн в вакууме:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (77.1)$$

Совпадение скорости распространения электромагнитных волн со скоростью света привело Максвелла к созданию электромагнитной теории света.

Электромагнитные волны были получены впоследствии в экспериментах немецкого физика Г. Герца, подтвердившего тем самым справедливость гипотезы Максвелла.



Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте гипотезу Максвелла.
2. Как опишут явление возникновения тока в замкнутом контуре наблюдатели K и K' , о которых говорится в параграфе?
3. Каким образом Дж. Максвелл предсказал существование электромагнитных волн?
4. Выведите формулу для расчета скорости распространения электромагнитных волн.

Творческая мастерская

Наблюдайте

Проезжая в автомобиле под мостом или в тоннеле, вы обнаруживаете плохую работу радиоприемника автомагнитолы. В чем причина этого явления?

Экспериментируйте

Включите и выключите свет в комнате. В работающем радиоприемнике вы услышите щелчки. Чем они вызваны?

Объясните

1. Как опишут явление возникновения индукционного тока в контуре наблюдателя K и K_1 , о которых говорится в параграфе?
2. Назовите условия, при которых электрический заряд порождает:
 - а) электрическое поле;
 - б) магнитное поле;
 - в) электромагнитное поле.

Анализируйте

1. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не является абсолютно верным?
2. Чем может быть порождено магнитное поле?
3. Что подтолкнуло Максвелла к идее, что свет является электромагнитной волной?

Решайте

1. Коротковолновый радиопередатчик излучает радиоволны длиной от 10 м до 100 м. В каком интервале частот работает передатчик?

(Ответ: $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Гц)

2. Волны из вакуума попадают в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ . Какие характеристики волны изменяются при этом и каким образом?

(Ответ: v уменьшается в ϵ раз; λ уменьшается в ϵ раз; ν остается постоянной).

Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?

§ 78. Явление самоиндукции



Ключевые понятия: самоиндукция, индуктивность, энергия магнитного поля, объемная плотность энергии магнитного поля.

На этом уроке вы: ознакомитесь с явлением самоиндукции, с физической величиной *индуктивность*: научитесь рассчитывать индуктивность катушки (соленоида); научитесь выводить формулу энергии магнитного поля тока; проведете аналогию между механическими и магнитными величинами.

Самоиндукция. Рассмотрим цепь, состоящую из источника тока с ЭДС \mathcal{E} , резистора R и ключа K (рис. 78.1). Если замкнуть ключ, то, как показывает опыт, ток достигнет своего максимального значения $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{R}$ не мгновенно, а спустя некоторое время Δt (рис. 78.2). Это явление объясняется законом электромагнитной индукции Фарадея следующим образом. Сразу же после замыкания ключа начнет расти ток I в контуре, а вместе с ним создаваемое этим током магнитное поле \vec{B} .

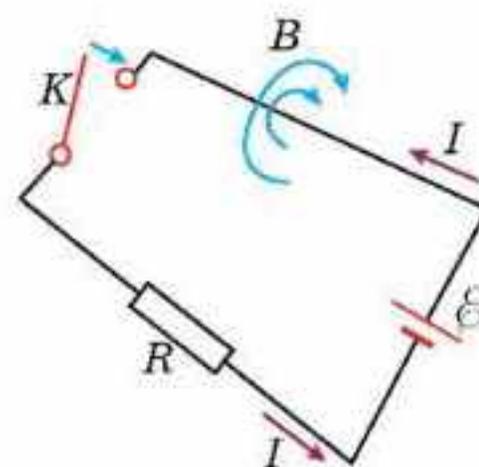


Рис. 78.1

Изменяющийся со временем магнитный поток, пронизывающий контур, вызовет появление в цепи ЭДС индукции. Согласно правилу Ленца, направление ЭДС индукции будет таким, что вызываемый ею индукционный ток создаст магнитное поле, которое будет препятствовать изменению первоначального магнитного поля \vec{B} .

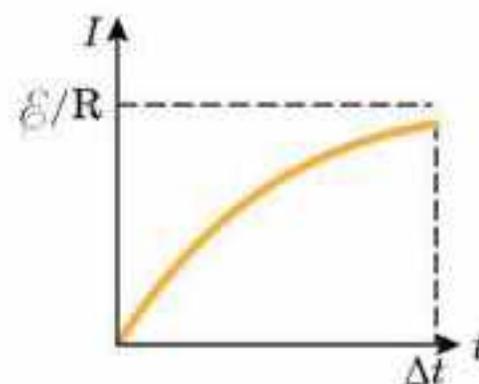


Рис. 78.2

Таким образом, направление ЭДС индукции будет противоположным направлению ЭДС источника тока \mathcal{E} . Это и является причиной постепенного, а не скачкообразного роста силы тока до своего конечного значения I_{\max} . Рассмотренное нами явление называется *самоиндукцией*, так как в нем и сам изменяющийся магнитный поток сквозь контур, и ЭДС индукции порождаются самим контуром. ЭДС индукции, возникающая в этом случае, получила название ЭДС *самоиндукции* и обозначается \mathcal{E}_{si} .

Индуктивность. Для того, чтобы получить выражение для ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} , вспомним, что согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока, взятой с отрицательным знаком: $\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. В случае самоиндукции магнитный поток Φ определяется магнитной индукцией B поля, создаваемого током в контуре, которая, в свою очередь, зависит от силы тока I в контуре: $\Phi \sim B \sim I$.

В таком случае, мы можем записать:

$$\Phi = LI, \quad (78.1)$$

где коэффициент пропорциональности L называется *индуктивностью* контура.

Индуктивность контура зависит от геометрической формы, размеров контура и магнитных свойств среды, в которую он помещен. Единицей индуктивности в Международной системе единиц (СИ) является *генри* (Гн). С учетом (78.1) мы можем выразить ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} следующим образом:

$$\mathcal{E}_{si} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (78.2)$$

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока. Знак “-” показывает, что ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} , а, следовательно, и ток самоиндукции всегда препятствует изменению силы основного тока.

Индуктивность соленоида. Явление самоиндукции заметно проявляется для контуров с большой индуктивностью. Значительной индуктивностью обладает *соленоид* — цилиндрическая обмотка, длина которой намного превышает ее диаметр. Получим выражение для индуктивности соленоида длиной l , площадью поперечного сечения S , количеством витков N , плотно намотанных друг к другу, и сердечником из материала с магнитной проницаемостью ∞ . Нам известно, что магнитная индукция поля, создаваемого соленоидом $B = \infty_0 \infty nI$, где $n = \frac{N}{l}$ — количество витков на единицу длины соленоида. Тогда магнитный поток сквозь каждый виток соленоида равен:

$$\Phi_0 = BS = \infty_0 \infty \frac{NS}{l} I.$$

Магнитный поток, пронизывающий все витки соленоида, находится как $\Phi = N\Phi_0$. Применяя формулу (78.1) для нахождения индуктивности соленоида, получим:

$$L = \frac{N\Phi_0}{I} = \frac{\mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} I}{I} = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S. \quad (78.3)$$

Из формулы (78.3) следует, что индуктивность соленоида зависит от геометрии самого соленоида, магнитной проницаемости среды и пропорциональна квадрату количества витков.

Энергия магнитного поля тока. Вернемся к опыту, рассмотренному в начале параграфа. В течение времени Δt , пока сила тока после замыкания цепи возрастает от нуля до своего установившегося значения $\frac{\mathcal{E}}{R}$

(рис. 78.2), часть энергии источника тока с ЭДС \mathcal{E} , будет выделяться в виде тепла на резисторе R . Остальная ее часть идет на преодоление ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_{si} и будет накапливаться в виде энергии магнитного поля тока W_m . Для того, чтобы рассчитать ее, запишем для нашего контура правило Кирхгофа: $\mathcal{E} + \mathcal{E}_{si} = IR$. С учетом (78.2) получим:

$$\mathcal{E} = IR + L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Умножим обе части уравнения на заряд $\Delta q = I \Delta t$, переносимый вдоль контура за время Δt .

$$\mathcal{E} I \Delta t = I^2 R \Delta t + L I \Delta I.$$

В этом выражении $\mathcal{E} I \Delta t$ есть работа, совершаемая источником тока, $I^2 R \Delta t$ — количество теплоты, выделяемого на резисторе R . Следовательно, согласно сказанному выше, $L I \Delta I$ есть не что иное, как энергия магнитного поля W_m , создаваемого током в контуре.

Так как индуктивность контура L не зависит от времени, мы можем заменить $L I \Delta I$ на $I \Delta(LI)$. С учетом $\Phi = LI$, мы можем записать для энергии магнитного поля тока:

$$W_m = I \Delta \Phi, \quad (78.4)$$

Пусть в некотором контуре с индуктивностью L ток возрастает от нуля до некоторого значения I . Согласно (78.1) магнитный поток, создаваемый током, также изменится от нуля до Φ (рис. 78.3). В таком случае $\Delta \Phi = \Phi$ и формулу (78.4) можно записать как $W_m = I \Phi$. Тогда энергию магнитного поля легко найти с помощью графика зависимости $\Phi(I)$, как площадь заштрихованного треугольника $W_m = \frac{\Phi I}{2}$. Учитывая, что $\Phi = LI$, получим выражение для энергии магнитного поля контура индуктивностью L , по которому течет ток силы I :

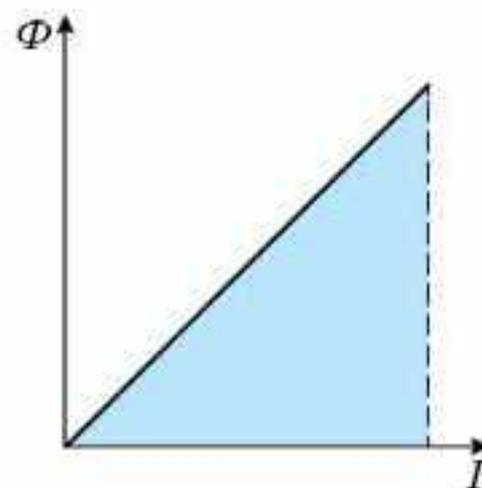


Рис. 78.3

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (78.5)$$

Энергия магнитного поля. Поместим в контур соленоид с индуктивностью L . Магнитное поле длинного соленоида однородно и полностью сосредоточено внутри соленоида. Выразим энергию этого поля через величину, характеризующую само поле — магнитную индукцию B . Так как магнитная индукция в соленоиде $B = \mu_0 n I$, то сила тока в нем равна $I = \frac{B l}{\mu_0 N}$. Подставим выражения для силы тока I и индуктивности соленоида L в формулу (78.5).

Тогда:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \left(\frac{Bl}{\mu\mu_0 N} \right)^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} Sl.$$

Учитывая, что $Sl = V$ — объем соленоида, получим формулу для энергии магнитного поля:

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} V. \quad (78.6)$$

Если энергия магнитного поля распределена равномерно по объему, то можно ввести понятие плотности энергии магнитного поля ω_m : *плотностью энергии магнитного поля называется отношение энергии магнитного поля к занимаемому им объему*. Тогда для однородного поля соленоида получим:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0}. \quad (78.7)$$

Хотя выражение (78.5) получено нами для однородного магнитного поля, его, как показывают более сложные расчеты, можно применять и в случае неоднородного поля.

Аналогия между магнитными и механическими величинами. Между явлениями самоиндукции в магнетизме и инерции в механике существует определенное сходство. Вспомним, что невозможно мгновенно изменить скорость тела, как бы велика ни была сила, действующая на него. Причиной тому, как нам известно из механики, является свойство инертности тела, мерой которой является его масса. Точно так же мы не можем скачком изменить силу тока в контуре, содержащем индуктивность. Нам известно, что этому препятствует ток самоиндукции, величина которого зависит от индуктивности контура. Следовательно, индуктивность L играет в магнитных явлениях такую же роль, как и масса m в механике. Исходя из этого, можно провести также аналогию между кинетической энергией движущегося тела $\frac{mv^2}{2}$ и энергией магнитного поля $\frac{LI^2}{2}$, импульсом тела mv и магнитным потоком LI .



Вопросы для самоконтроля

1. Какое явление называется *самоиндукцией*?
2. Объясните, почему в замкнутом контуре, по которому течет меняющийся либо по величине, либо по направлению ток, неизбежно возникает еще один ток, который назвали *током самоиндукции*.
3. По какой формуле можно рассчитать энергию магнитного поля?



Творческая мастерская

Объясните

Контур, содержащий большую индуктивность, нельзя резко размыкать. Объясните, почему?

Анализируйте

1. Между индуктивностью и массой можно провести аналогию. В чем заключается сходство между этими величинами?
2. Какая величина является аналогом импульса в механике?

Решайте

1. С помощью реостата равномерно увеличивают силу тока в катушке на $0,1 \text{ А}$ в 1 с . Индуктивность катушки $0,01 \text{ Гн}$. Найти среднее значение ЭДС самоиндукции.

(Ответ: 1 мВ)

2. Сколько витков проволоки диаметром $0,4 \text{ мм}$ с изоляцией ничтожной толщины нужно намотать на картонный цилиндр диаметром 2 см , чтобы получить однослойную катушку с индуктивностью 1 мГн ? Витки вплотную прилегают друг к другу.

(Ответ: 10^3)

3. Соленоид содержит 1000 витков. Площадь сечения сердечника равна 10 см^2 . По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $1,5 \text{ Тл}$. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время 500 мкс .

(Ответ: 3 кВ)

4. Соленоид содержит 1000 витков. Сила тока в его обмотке равна 1 А , магнитный поток через поперечное сечение соленоида равен $0,1 \text{ Вб}$. Вычислите энергию магнитного поля.

(Ответ: 50 мДж)

5. При индукции магнитного поля, равной 1 Тл , плотность энергии магнитного поля в железе равна 200 Дж/м^3 . Определите магнитную проницаемость железа в этих условиях.

(Ответ: $2 \cdot 10^3$)

6. Сколько витков должна иметь катушка, чтобы при изменении магнитного потока внутри нее от 24 мВб до 50 мВб за 32 с в ней создавалась средняя ЭДС индукции 10 В ?

(Ответ: $12\,300$)

7. Катушка с железным сердечником имеет площадь поперечного сечения 20 см^2 и индуктивность 20 мГн . Какой должна быть сила тока, чтобы индукция магнитного поля в сердечнике равнялась 1 мТл ? В катушке 1000 витков.

(Ответ: $0,1 \text{ А}$)

8. В вертикальном однородном магнитном поле с индукцией $0,2 \text{ Тл}$ поступательно движется горизонтально расположенный проводник длиной 50 см со скоростью

10 м/с так, что его скорость составляет с магнитным полем угол 30° , а с осью проводника — 60° . Найдите ЭДС индукции, возникающей в проводнике.

(Ответ: 0,435 В)

9. Прямолинейный проводник длиной 1,4 м находится в однородном магнитном поле с индукцией 74 мТл. Найдите разность потенциалов на концах проводника при его вращении с угловой скоростью 75 рад/с в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

(Ответ: 5,4 В)

10. В катушке индуктивностью 0,2 Гн сила тока 10 А. Какова энергия магнитного поля катушки? Как изменится энергия магнитного поля, если сила тока возрастет вдвое?

11. Однослойная катушка площадью 20 см^2 , содержащая 1000 витков провода, помещена в однородное магнитное поле с индукцией 8 мТл параллельно линиям магнитного поля. Сопротивление катушки 30 Ом. Какой заряд пройдет по катушке, если отключить магнитное поле?

(Ответ: 0,53 мКл)

12. Реактивный самолет летит горизонтально со скоростью 900 км/ч. Найдите разность потенциалов между концами его крыльев, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли равна 50 мкТл. Размах крыльев 24 м. Чему равна разность потенциалов, возникающая при этом между носом и хвостом самолета?

(Ответ: 0,3 В; 0 В)

13. Виток провода площадью 50 см^2 замкнут на конденсаторе емкостью 20 мкФ. Плоскость витка перпендикулярна однородному магнитному полю. Найдите скорость изменения магнитной индукции, если заряд на конденсаторе равен 1 нКл.

(Ответ: 10 мТл/с)

14. Кольцо радиусом 6 см из провода сопротивлением 0,2 Ом расположено в магнитном поле с индукцией 20 мТл перпендикулярно к нему. Кольцо складывают так, что получаются два одинаковых кольца в виде восьмерки, лежащие в той же плоскости, что и кольцо. После этого магнитное поле выключают. Определите, какой заряд протечет по проводу за время: а) когда кольцо складывают; б) когда выключают магнитное поле.

(Ответ: 0,56 мКл; 1,13 мКл)



Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы?

§ 79. Электромагнитные устройства



Ключевые понятия: генератор переменного тока, генератор постоянного тока, электродвигатель, трансформатор.

На этом уроке вы: узнаете о принципе действия генераторов переменного и постоянного тока; ознакомитесь с устройством и принципом действия электродвигателя и трансформатора.

Генератор переменного тока. На явлении электромагнитной индукции основано действие генераторов переменного тока. *Переменным* называют электрический ток, который периодически изменяется со временем, как по величине, так и по направлению. Переменный ток широко используется в электроэнергетике и электротехнике. *Генератором переменного тока называется устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.* Рассмотрим принцип действия генератора на примере проволочной рамки, вращающейся в постоянном однородном магнитном поле (рис. 79.1). При вращении рамки с постоянной угловой скоростью вокруг своей оси, магнитный поток, пронизывающий рамку, будет меняться периодически. Следовательно, в ней возникнет периодически меняющийся индукционный ток, называемый *переменным* (рис. 79.2). Для предотвращения закручивания проводов при вращении рамки, ток от нее отводят во внешнюю цепь при помощи *скользящих контактных колец и щеток* (рис. 79.3).

Современные промышленные генераторы переменного тока могут отличаться друг от друга по конструкции. Но все они состоят из одних и тех же основных частей: 1) постоянный магнит или электромагнит, создающий магнитное поле; 2) обмотка, в которой возбуждается переменная ЭДС индукции. Для получения высокого амплитудного значения ЭДС в обмотке, она должна содержать большое число витков, так как ЭДС, возбуждаемые в последовательно соединенных витках, складываются.

Для вращения обмотки генератора можно использовать различные виды энергии. Например, в гидроэлектростанциях для этой цели используют энергию падающей воды, а в тепловых электростанциях — кинетическую энергию пара.

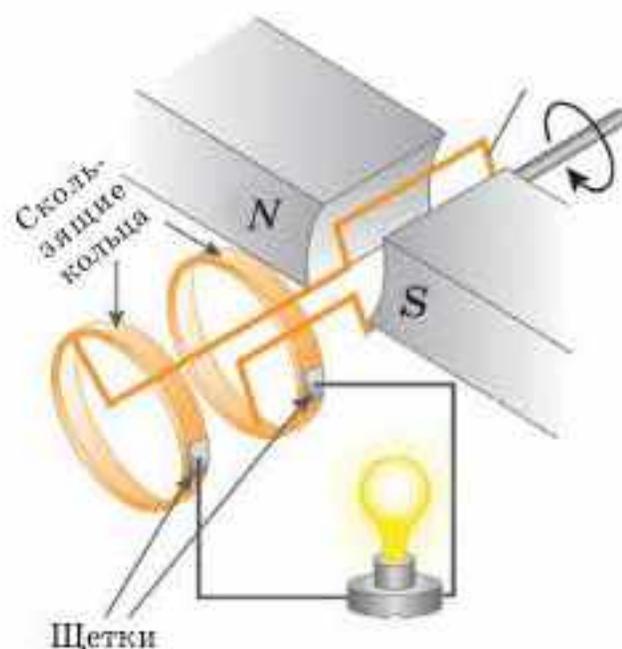


Рис. 79.1

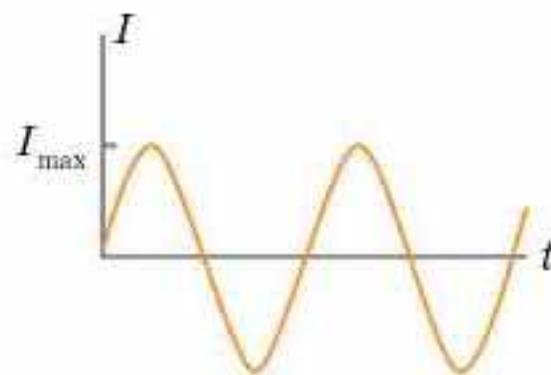


Рис. 79.2

Генератор постоянного тока. Ток, не изменяющийся с течением времени, называется *постоянным*. Конструкция генератора постоянного тока, по сути, такая же, как у генератора переменного тока. Но, в отличие от генератора переменного тока, концы рамки в генераторе постоянного тока присоединяются не к скользящим контактными кольцам, а к двум изолированным друг от друга полукольцам (рис. 79.3) *коммутатора* и вращаются вместе с ними. Так как щетки генератора неподвижны, то они попеременно соприкасаются то с одним, то с другим полукольцом. Поскольку одновременно с этим меняется полярность

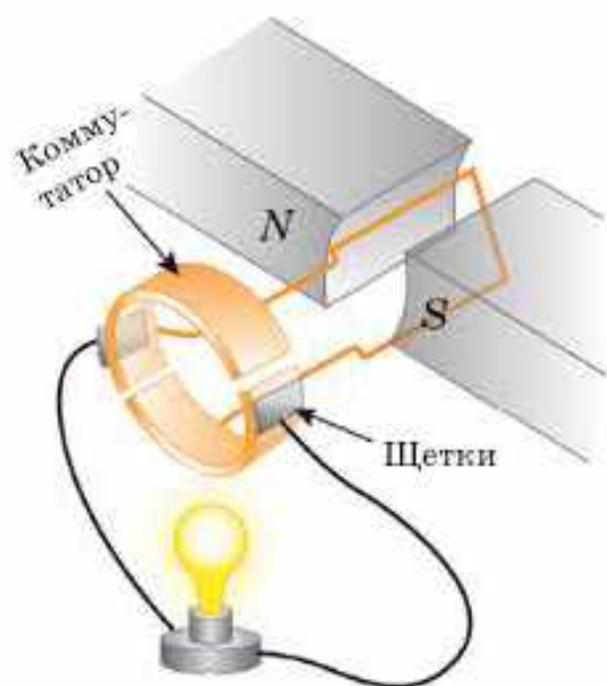


Рис. 79.3

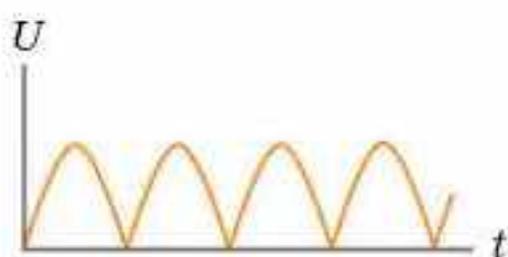


Рис. 79.4

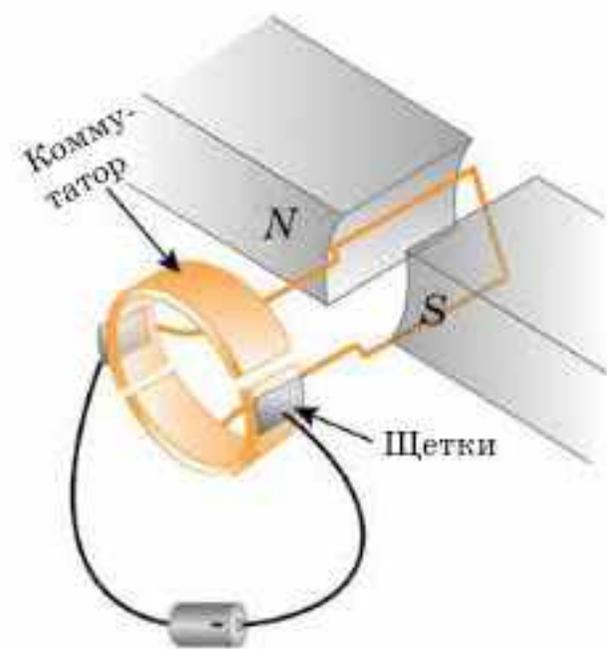


Рис. 79.5

возбуждаемой в рамке ЭДС, то полярность полуколец коммутатора, а, следовательно, и полярность напряжения на выходе остается одной и той же. График этого напряжения будет иметь вид пульсаций (рис. 79.4). Путем сглаживания пульсаций можно добиться на выходе генератора практически не изменяющегося по времени напряжения. Сглаживание пульсаций можно произвести применением большего количества рамочных контуров, каждый из которых присоединяется к собственной паре полуколец. Совокупность таких контактных полуколец, разделенных изолирующими промежутками, называется *коллектором*.

Электродвигатель. *Электродвигателем* называется устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую работу. По-существу, электродвигатель — это генератор тока, но работающий обратно. Принцип работы электродвигателя основан на действии силы Ампера. Рамка с током представляет собой электромагнит, полюса которого будут взаимодействовать с полюсами постоянного магнита. Возникающая при этом пара сил, действующая на рамку, заставит ее повернуться. Для того чтобы добиться непрерывного вращения, в электродвигателе применяется коммутатор — система из двух изолированных друг от друга полуколец (рис. 79.5). К полукольцам коммутатора с помощью щеток подается ток от батареи. Щетки при вращении рамки будут соприкасаться попеременно то с одним, то с другим полукольцом, меняя тем самым

направление тока в рамке на противоположное. Это приводит к тому, что северный полюс электромагнита, который, повернувшись на 180° , притянулся к южному полюсу постоянного магнита, автоматически поменяется на южный. Тогда рамка не остановится, а благодаря инерции и отталкиванию одноименных полюсов продолжит свое вращение.

В современном мире электродвигатели используются в качестве электропривода машин и механизмов практически в любом секторе промышленности и во многих бытовых приборах. Электродвигатели обладают рядом преимуществ по сравнению с тепловыми двигателями: 1) КПД электродвигателей примерно в два раза выше; 2) электродвигатели более компактны; 3) электродвигатели наносят меньший экологический ущерб природе.

Трансформатор. Помимо рассмотренных нами выше устройств, существуют множество других, действие которых так или иначе связано с явлением электромагнитной индукции. Одно из таких устройств, называемое *трансформатором*, служит для преобразования переменного тока. Трансформатор состоит из двух катушек, связанных между собой индуктивно посредством сердечника, выполненного из ферромагнитного материала (рис. 79.6).

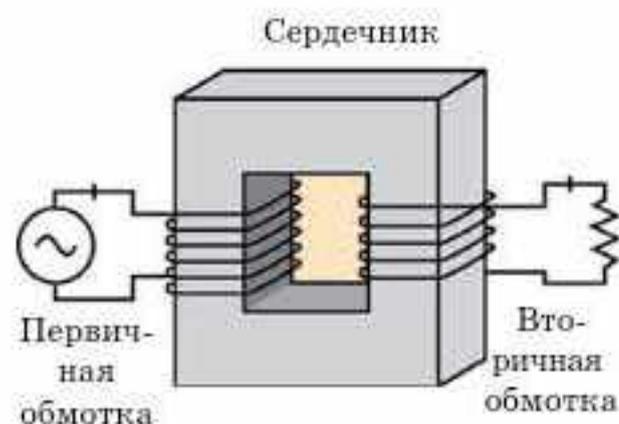


Рис. 79.6

К одной из катушек, называемой *первичной обмоткой*, подключается генератор переменного тока. Вторая катушка, которую называют *вторичной обмоткой*, является частью цепи с нагрузкой R . Переменный ток, протекающий в витках первичной обмотки, создаст в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Этот магнитный поток, пронизывая витки обеих обмоток, возбуждает в них ЭДС индукции. Так как величина ЭДС, индуцируемая в первичной и вторичной обмотках, пропорциональна количеству витков в них, то отношение ЭДС в обмотках равно отношению количества витков соответствующих обмоток:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Следовательно, подбирая количество витков в обмотках, можно повышать или понижать напряжение во вторичной обмотке. Повышающие и понижающие трансформаторы применяют для передачи электроэнергии по проводам на большие расстояния.



Вопросы для самоконтроля

1. На каком законе основано действие генератора переменного тока?
2. Какова роль коммутатора в генераторе постоянного тока?
3. На чем основано действие электродвигателя?
4. Для чего служит сердечник трансформатора?

Творческая мастерская

Наблюдайте

Приведите примеры бытовых электроприборов в вашем доме, в которых используются электродвигатели.

Объясните

1. Вращающуюся часть генератора называют ротором, а неподвижную — статором. Объясните, почему в больших промышленных генераторах переменного тока ротором является не обмотка, в которой индуцируется ЭДС, а электромагнит.

2. Почему на гидроэлектростанциях применяются генераторы с роторами, имеющими большое число пар полюсов?

3. Объясните, почему КПД трансформаторов намного выше, чем у генераторов и электродвигателей.

Творите

Воспользовавшись интернет-ресурсами, соберите простейшую модель электродвигателя.

Анализируйте

Какие энергетические преобразования происходят в гидроэлектростанции?

Решайте

1. Сколько пар магнитных полюсов имеет ротор гидрогенератора, совершающий 125 об/мин, если генератор вырабатывает переменный ток стандартной частоты 50 Гц?

(Ответ: 24)

2. Ротор генератора переменного тока вращается с постоянной частотой в однородном магнитном поле. Как изменится ЭДС индукции при увеличении индукции магнитного поля в 2 раза?

(Ответ: увеличится в 2 раза)

3. Напряжение на первичной обмотке понижающего трансформатора 220 В, мощность 44 Вт. Определите силу тока во вторичной обмотке, если отношение числа витков обмоток $k = \frac{N_1}{N_2} = 5$. (Потери энергии не учитывать)?

(Ответ: 1 А)

Рефлексия

1. Какие из определений, приведенных в этом параграфе, для вас остались непонятными?
2. На каком уровне вы усвоили приведенный в параграфе материал?
3. Нуждается ли вы в дополнительном разъяснении темы?

Закон электромагнитной индукции Фарадея гласит, что ЭДС индукции, возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \text{ где } \Phi = BScos\alpha \text{ магнитный поток.}$$

Знак “-” в законе электромагнитной индукции есть следствие **правила Ленца**, согласно которому, ЭДС индукции и индукционный ток направлены так, что противодействуют тому изменению магнитного потока, которым они вызваны.

Когда проводящий стержень длиной l движется со скоростью v в магнитном поле с индукцией B , то в нем возникает ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = -Blvsin\alpha$, где α — угол между вектором скорости \vec{v} и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Когда ток в катушке со временем изменяется, то в ней, согласно закону электромагнитной индукции, возникает ЭДС индукции. ЭДС самоиндукции выражается формулой:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где L — **индуктивность** катушки.

Индуктивность катушки $L = \frac{N\Phi}{I}$, где Φ — магнитный поток через катушку, N — количество витков в ней. Единица измерения индуктивности **генри**: $1 \text{ Гн} = 1 \text{ (В}\cdot\text{с)/А}$. Индуктивность проводника зависит от его формы и геометрических размеров. Например, индуктивность прямолинейной катушки — соленоида рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

где S — площадь поперечного сечения соленоида, l — его длина.

Согласно Максвеллу, причиной возникновения ЭДС индукции и индукционного тока в контуре является **вихревое электрическое поле, порождаемое в пространстве переменным магнитным полем.**

Максвелл выдвинул также **гипотезу, согласно которой переменное электрическое поле порождает в пространстве магнитное поле.**

Следствием электромагнитной теории Максвелла является существование **электромагнитных волн, распространяющихся со скоростью света.**



Лабораторная работа № 6

Изучение смешанного соединения проводников

Цель: изучить работу электрических цепей со смешанным соединением потребителей тока.

Оборудование: 1) вольтметры (3 шт.); 2) переменный резистор сопротивлением 100 — 1000 Ом; 3) лампы 6,3 В · 0,3 А (3 шт.); 4) источник питания ИПФ; 5) соединительные провода.

Ход работы:

Задание 1. Изучите электрическую схему со смешанным соединением, в которой переменный резистор играет роль дополнительного сопротивления.

1. Соберите схему по рисунку 1.
2. Укажите, как соединены между собой переменный резистор R и лампы L_1 , L_2 .
3. Измерьте напряжение между точками 1 и 2 (U_1), 2 и 3 (U_2), 1 и 3 (U) при крайних положениях движка переменного резистора.
4. Убедитесь в справедливости равенства $U = U_1 + U_2$.
5. Перемещайте движок резистора. Объясните причину изменения яркости свечения ламп.

Задание 2. Изучите схему смешанного соединения с переменным резистором, выполняющим функцию шунта (обходного пути).

1. Соберите электрическую цепь по рисунку 2.
2. Скажите, как соединены между собой лампы L_1 , L_2 и переменный резистор.
3. Включите вольтметры параллельно лампам. Проследите за их показаниями и яркостью свечения ламп при движении ручки переменного резистора от одного крайнего положения до другого. Объясните наблюдаемый эффект.
4. Поставьте движок резистора в положение, обеспечивающее максимальное сопротивление (верхнее на рисунке 8). Запомните яркость свечения ламп и запишите показания вольтметров.

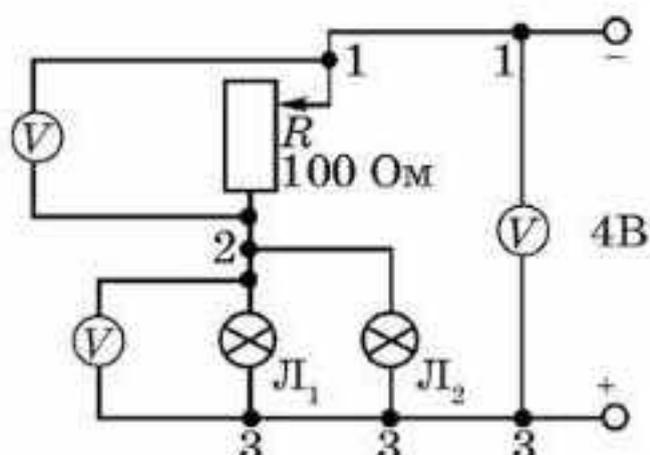


Рис. 1

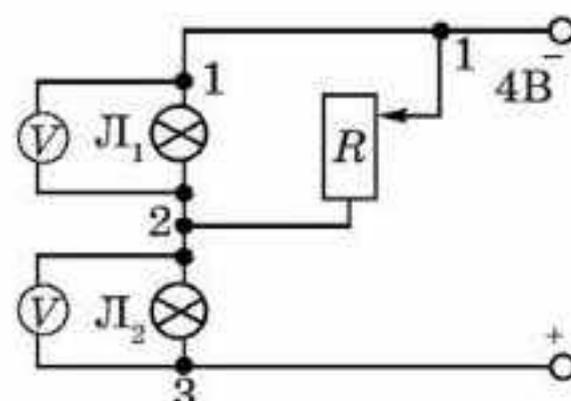


Рис. 2

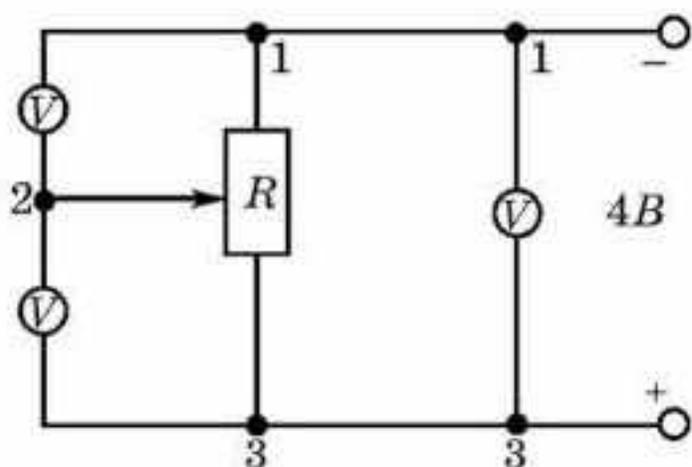


Рис. 3

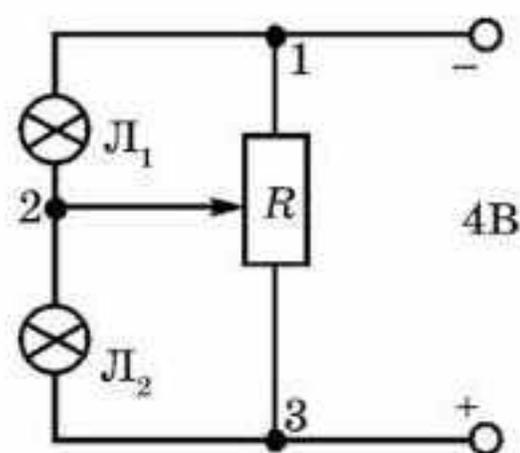


Рис. 4

5. Передвиньте движок резистора в положение, обеспечивающее наименьшее сопротивление (нижнее на рисунке 2). Запомните яркость свечения ламп, запишите показания приборов.

6. Сравните яркость свечения ламп и показания приборов в обоих случаях. Объясните, почему при малом сопротивлении резистора (второй случай) лампа L_1 не горит, а подключенный к ней вольтметр не показывает напряжения.

Задание 3. Изучите схему смешанного соединения с переменным резистором, выполняющим роль потенциометра (делителя напряжения).

1. Соберите электрическую цепь по рисунку 3.

2. Перемещайте движок резистора от одного крайнего положения до другого. Проследите за показаниями вольтметров.

3. Убедитесь, что общее напряжение в цепи (между точками 1 и 3) при любом положении движка резистора равно сумме показаний вольтметров V_1 и V_2 , т. е. переменный резистор поделит общее напряжение U на составляющие U_1 и U_2 .

4. Соберите цепь по рисунку 4, заменив вольтметры V_1 и V_2 лампами. Перемещая движок резистора и наблюдая за яркостью свечения ламп, подтвердите вывод, сделанный в предыдущем пункте.

Лабораторная работа №7 **Определение ЭДС источника тока** **и его внутреннего сопротивления**

Оборудование: 1) источник тока (батарейка на 4,5 В); 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) реостат (6 Ом); 5) соединительные провода.

Теория

Используя закон Ома для замкнутой цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$, с помощью реостата поменяйте силу тока в цепи, схема которой приводится на рисунке 2. Проведя несколько измерений по показаниям амперметра

и вольтметра, определите ЭДС \mathcal{E} и внутреннее сопротивление r источника тока.

$$1) I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r} \text{ и } R_1 = \frac{U_1}{I_1}, \text{ тогда } I_1 R_1 + I_1 r = \mathcal{E} \text{ или } U_1 + I_1 r = \mathcal{E}.$$

$$2) U_2 + I_2 r = \mathcal{E}, \text{ отсюда } U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r. \text{ Следовательно,}$$

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}. \quad (1)$$

Так как $I_1 r = \mathcal{E} - U_1$, а $I_2 r = \mathcal{E} - U_2$, то

$$\mathcal{E} = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}. \quad (2)$$

Ход работы:

1. Соберите цепь по схеме рисунка 5.

2. Поместите ползунок посередине реостата.

3. Снимите показания амперметра I_1 и вольтметра U_1 .

4. Переместите ползунок реостата в новое положение.

5. Снимите новые показания амперметра I_2 и вольтметра U_2 .

6. По формулам 1 и 2 рассчитайте величины внутреннего сопротивления и ЭДС источника.

7. Рассчитайте ошибку измерений.

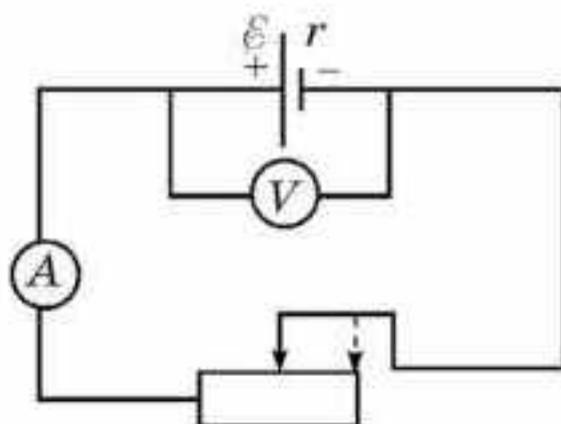


Рис. 5

Лабораторная работа №8

Вольтамперная характеристика лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода

Цель работы: Исследовать зависимость силы тока в проводнике, лампе накаливания и полупроводниковом диоде от напряжения на его концах при постоянном сопротивлении.

Оборудование: источник тока (12 В); вольтметр; амперметр; ключ; резистор; полупроводниковый диод; патрон для лампы, лампа накаливания (12 В); соединительные провода.

Ход работы:

1. Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 6.

2. Включите источник питания.

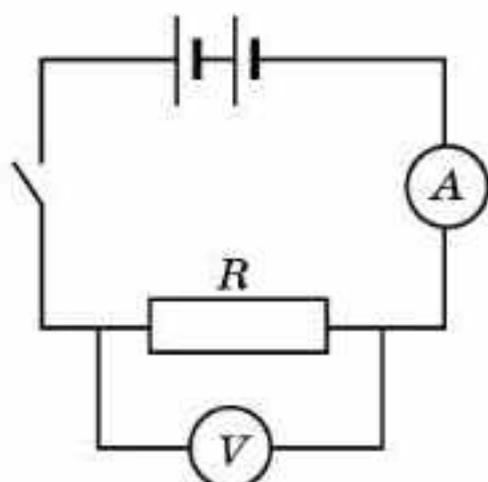


Рис. 6

3. Замкните выключатель.
4. Увеличивайте напряжение с 0 В до 10 В каждый раз на 2 В, измеряйте при этом силу тока, напряжение на резисторе.
5. Запишите результаты в таблицу 1.
6. Вычислите отношение измеренного на резисторе напряжения к измеренному значению силы тока и полученные значения сопротивления занесите в таблицу.

Таблица 1

№	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

7. Замените резистор лампой накаливания (12 В) (рис. 7).

8. Включите снова блок питания, замкните выключатель и повторите всю серию измерений.

9. Полученные данные для силы тока и напряжения на лампе занесите в таблицу 2.

10. Вычислите отношение измеренного на резисторе напряжения к измеренному значению силы тока и полученные значения сопротивления занесите в таблицу.

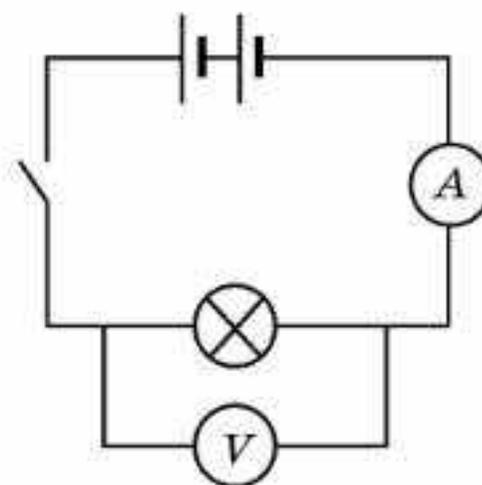


Рис. 7

Таблица 2

№	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

11. Замените лампу накаливания полупроводниковым диодом (рис. 8).

12. Включите снова блок питания, замкните выключатель и повторите всю серию измерений.

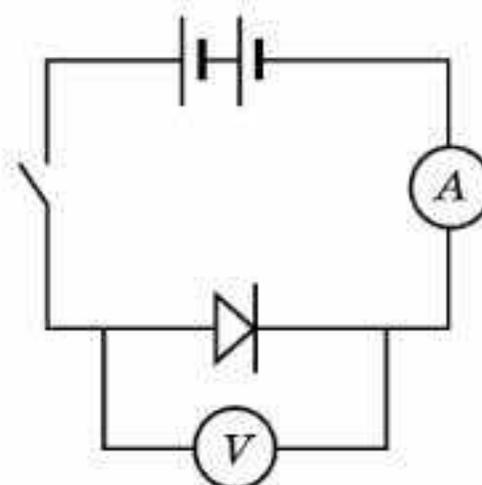


Рис. 8

13. Занесите в таблицу 3 полученные вами данные для силы тока и напряжения на диоде.

Таблица 3

№	U , В	I , А
1		
2		
3		
4		
5		
6		

14. Разомкните цепь и выключите источник тока. Соберите схему для снятия вольтамперной характеристики полупроводникового диода при обратном направлении тока.

15. Включите снова блок питания, замкните выключатель и повторите всю серию измерений.

16. Занесите в таблицу 4 полученные вами данные для силы тока и напряжения на диоде при обратном направлении тока через диод.

Таблица 4

№	U , В	I , А
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Обработка экспериментальных данных

1. Постройте по данным таблицы 1 график зависимости силы тока от напряжения для резистора.

2. По данным таблицы 2 постройте график зависимости силы тока от напряжения для лампы накаливания.

3. Постройте по данным таблиц 3 и 4 график зависимости силы тока от напряжения для полупроводникового диода для прямого и обратного направлений тока через диод.

Лабораторная работа №9

Измерение электрического заряда одновалентного иона

Цель работы: экспериментально определить заряд одновалентного иона.

Оборудование: электролитическая ванна с водным раствором медного купороса (Cu_2SO_4), источник тока (12 В), амперметр, реостат,

2 медных электрода, ключ, соединительные провода, секундомер, весы электронные.

Ход работы:

1. Очистите поверхность одного из медных электродов с помощью наждачной бумаги. Промойте его под краном и высушите.

2. С помощью электронных весов определите массу m_1 этого электрода.

3. Соберите электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 9. Электрод, массу которого вы определили, должен быть присоединен к отрицательной клемме источника тока.

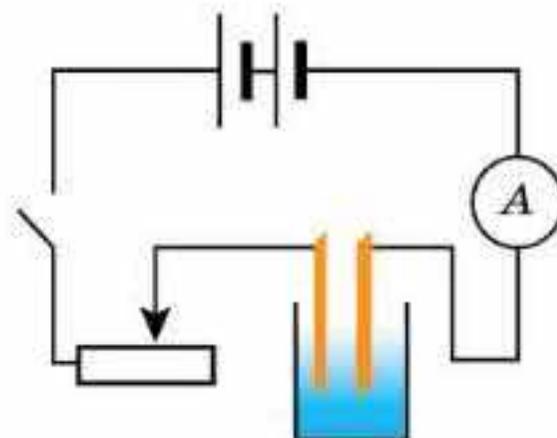


Рис. 9

4. Включите источник тока и замкните цепь.

5. С помощью реостата установите силу тока в цепи, равной 1 А, и в течение всего опыта поддерживайте ее постоянной.

6. Включите секундомер.

7. По прошествии 20 мин разомкните цепь и выключите источник тока.

8. Выньте из ванны медный электрод-катод. Высушите и определите его массу m_2 с помощью электронных весов.

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитайте электрохимический потенциал меди, используя формулу первого закона электролиза Фарадея:

$$k = \frac{\Delta m}{It}. \quad (1)$$

Используя найденное значение k и учитывая, что для меди валентность $z = 2$, а молярная масса $M = 64 \cdot 10^{-3}$ кг, определите постоянную Фарадея с помощью второго закона электролиза:

$$F = \frac{M}{kz}. \quad (2)$$

По формуле $F = eN_A$ рассчитайте заряд одновалентного иона, учитывая, что $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 9.

Таблица 9

m_1 , кг	m_2 , кг	$\Delta m = m_2 - m_1$, кг	I , А	t , с	k , кг/Кл	F , Кл/моль	e , Кл

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 10. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 49. Электрический заряд. Электризация. Закон сохранения электрического заряда	4
§ 50. Закон Кулона	7
§ 51. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Силовые линии электрического поля	12
§ 52. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса	21
§ 53. Работа сил электрического поля	25
§ 54. Потенциал электрического поля	29
§ 55. Проводники в электрическом поле	37
§ 56. Диэлектрики в электрическом поле	41
§ 57. Электрическая емкость	46
§ 58. Устройство и типы конденсаторов	49
§ 59. Энергия электрического поля	53

Глава 11. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 60. Условия существования постоянного тока. Закон Ома для участка цепи	62
§ 61. Последовательное и параллельное соединение проводников в электрической цепи. Закон Ома для полной цепи	70
§ 62. Правила Кирхгофа	78
§ 63. Работа и мощность тока. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля — Ленца	81

Глава 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 64. Электрический ток в металлах	87
§ 65. Электрический ток в полупроводниках	93
§ 66. Электрический ток в жидкостях	102
§ 67. Электрический ток в газах	109
§ 68. Электрический ток в вакууме	117

Глава 13. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 69. Магнитное поле. Взаимодействие параллельных токов	125
§ 70. Сила Ампера	131
§ 71. Контур с током в магнитном поле	137
§ 72. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в электрических и магнитных полях	146
§ 73. Магнитное поле в веществе	158

Глава 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 74. Закон электромагнитной индукции	165
§ 75. Правило Ленца	169
§ 76. ЭДС индукции в движущихся проводниках	173

§ 77. Гипотеза Максвелла	177
§ 78. Явление самоиндукции	181
§ 79. Электромагнитные устройства	187
Лабораторная работа № 6. Изучение смешанного соединения проводников	192
Лабораторная работа № 7. Определение ЭДС источника тока и его внутреннего сопротивления	193
Лабораторная работа № 8. Вольтамперная характеристика лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода	194
Лабораторная работа № 9. Измерение электрического заряда одновалентного иона	196