

3. По круговому витку проходит электрический ток (рис. 161). Как расположится магнитная стрелка, если её поместить в центр витка? Действие магнитного поля Земли не учитывать.

4. Как будут взаимодействовать две катушки, подвешенные на тонких проводах, если их подключить к источникам тока так, как изображено на рисунке 162?

5. При подключении соленоида к полюсам источника тока он отталкивается от расположенного вблизи постоянного магнита (рис. 163). В каком направлении идёт ток в соленоиде?

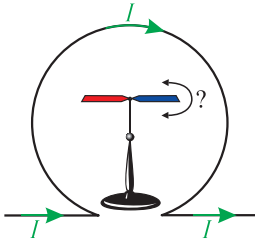


Рис. 161

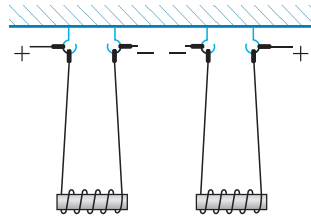


Рис. 162

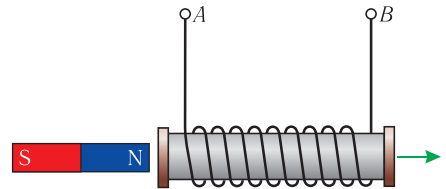


Рис. 163

## § 29. Сила Ампера.

### Принцип суперпозиции магнитных полей

Для количественного описания магнитного поля необходимо знать не только направление индукции магнитного поля, но и её модуль. Характеристики электростатического поля определяют с помощью пробного заряда. Для определения характеристик магнитного поля используют «пробный» ток, который представляет собой малый участок проводника (элемент тока).

**Модуль индукции магнитного поля.** Действие магнитного поля на находящийся в нём малый участок проводника с током экспериментально исследовал Ампер, осуществив опыты с различными проводниками, входящими в замкнутые электрические цепи. В 1820 г. Ампер установил, что модуль силы, которой однородное магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током, зависит от величин, характеризующих этот проводник. Этими величинами являются сила тока  $I$ , проходящего по проводнику, и длина  $l$  прямолинейного участка проводника. Кроме того, оказалось, что модуль магнитной силы зависит от угла между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Причём при определённых силе тока и длине проводника модуль



магнитной силы максимален, когда проводник расположен перпендикулярно направлению индукции магнитного поля.

Из опытов следует, что модуль силы, действующей со стороны однородного магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, пропорционален силе тока  $I$ , длине этого участка  $\Delta l$  и синусу угла  $\alpha$  между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля:

$$F \sim I\Delta l \sin \alpha.$$

Эта сила названа в честь А.-М. Ампера *силой Ампера*.

Так как  $F_{\max} \sim I\Delta l$ , то отношение  $\frac{F_{\max}}{I\Delta l}$  для данной области магнитного поля не зависит ни от силы тока  $I$  в проводнике, ни от длины  $\Delta l$  прямолинейного участка проводника, полностью находящегося в однородном магнитном поле. Поэтому данное отношение может служить характеристикой той области магнитного поля, в которой находится участок проводника. Это позволяет дать следующее определение индукции магнитного поля.

**Индукция магнитного поля** — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению максимального значения силы, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока в нём и длины этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}. \quad (29.1)$$

Таким образом, в каждой точке магнитного поля могут быть определены как направление индукции магнитного поля, так и её модуль.

В СИ индукцию магнитного поля измеряют в теслах (Тл) в честь сербского инженера и изобретателя Николы Теслы (1856–1943), с 1884 г. работавшего в США.

1 Тл — индукция однородного магнитного поля, в котором на прямолинейный участок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны поля максимальная сила, модуль которой 1 Н.

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

### От теории к практике

Прямолинейный проводник длиной  $\Delta l = 40$  см находится в однородном магнитном поле. Сила тока, проходящего по проводнику,  $I = 4,0$  А. Чему равен модуль магнитной индукции, если модуль максимальной силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля,  $F_{\max} = 48$  мН?



**Закон Ампера.** Из выражения (29.1) следует, что максимальное значение силы Ампера:

$$F_{\max} = B I \Delta l.$$

Экспериментально доказано, что в общем случае модуль силы Ампера можно рассчитать по формуле

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha. \quad (29.2)$$

Выражение (29.2) называют *законом Ампера*.

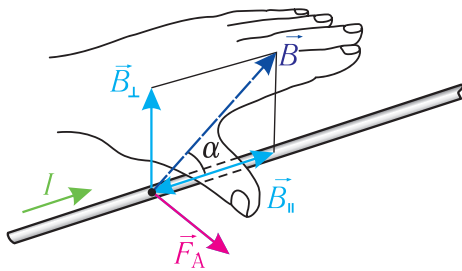


Рис. 164

**Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки:** если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля  $\vec{B}_{\perp}$  входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на  $90^\circ$  в плоскости ладони большой палец укажет направление силы Ампера, действующей на прямолинейный участок проводника с током (рис. 164).

### От теории к практике

1. На прямолинейный проводник с током, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$ , действует магнитная сила  $\vec{F}$ .

а) Как изменятся модули индукции однородного магнитного поля  $B$  и силы Ампера  $F_A$ , если силу тока в проводнике увеличить в 2,5 раза?

б) Как изменится модуль силы  $F_A$ , если проводник расположить параллельно линиям магнитной индукции?

2. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен проводник с током, согнутый под прямым углом. Под каким углом друг к другу направлены силы Ампера, действующие на стороны этого угла?



**Принцип суперпозиции магнитных полей.** В случае, когда магнитное поле создаётся несколькими источниками, индукцию результирующего магнитного поля можно определить по **принципу суперпозиции**: если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими

токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (движущимся зарядом):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$



## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Индукция магнитного поля — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению максимального значения силы, действующей со стороны однородного магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока в нём и длины этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

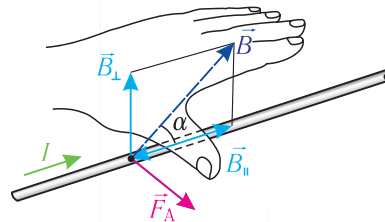
Принцип суперпозиции: если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (или движущимся зарядом):

$$B = B_1 + B_2 + \dots + B_n$$

Модуль силы, действующей на прямолинейный проводник с током со стороны однородного магнитного поля (модуль силы Ампера), можно рассчитать по формуле

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями тока и индукции магнитного поля



Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля  $\vec{B}_\perp$  входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на  $90^\circ$  в плоскости ладони большой палец укажет направление силы Ампера, действующей на участок проводника с током



1. Какая физическая величина характеризует магнитное поле в каждой его точке?
2. Как определяют модуль индукции магнитного поля? В каких единицах измеряют индукцию магнитного поля?
3. Как определяют модуль силы Ампера? При каком значении угла между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля модуль силы, действующей на проводник с током со стороны поля, максимален? равен нулю?
4. Как определить направление силы Ампера?
5. Сформулируйте принцип суперпозиции магнитных полей.



### Пример решения задачи

В однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально и её модуль  $B = 0,50$  Тл, на лёгких проводах горизонтально подвешен прямолинейный металлический стержень длиной  $l = 0,20$  м и массой  $m = 50$  г. Сила тока, проходящего по стержню,  $I = 5,0$  А. Определите, на какой угол от вертикали отклонились провода, поддерживающие стержень. Воздействием магнитного поля на ток в подводящих проводах пренебречь.

Дано:

$$B = 0,50 \text{ Тл}$$

$$l = 0,20 \text{ м}$$

$$m = 50 \text{ г} =$$

$$= 0,050 \text{ кг}$$

$$I = 5,0 \text{ А}$$

$$\alpha = ?$$

Решение. На стержень действуют силы упругости проводов  $\vec{F}_{\text{упр}} = \vec{F}_{\text{упр}_1} + \vec{F}_{\text{упр}_2}$ , сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила Ампера  $\vec{F}_A$  (рис. 165). Модуль этой силы определяют по закону Ампера:  $F_A = BIl$ . При равновесии стержня векторная сумма сил равна нулю:  $\vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} + \vec{F}_A = \vec{0}$ . Из рисунка 165 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{BIl}{mg}.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,50 \text{ Тл} \cdot 5,0 \text{ А} \cdot 0,20 \text{ м}}{0,050 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 1,0,$$

следовательно,  $\alpha = 45^\circ$ .

Ответ:  $\alpha = 45^\circ$ .

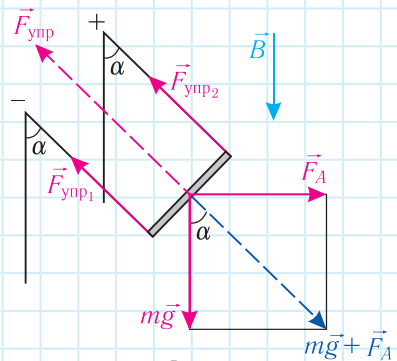


Рис. 165

### Упражнение 21

1. Прямолинейный проводник длиной  $l = 40$  см находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 0,50$  Тл. Сила тока в проводнике  $I = 8,0$  А. Определите наибольшее и наименьшее значения силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля.

2. Прямолинейный проводник длиной  $l = 1,5$  м находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 0,20$  Тл. Сила тока в проводнике  $I = 3,0$  А. Определите угол между направлениями тока и индукции магнитного поля, если на проводник действует сила Ампера, модуль которой  $F = 0,64$  Н.

3. Прямолинейный проводник длиной  $l = 50$  см расположен перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля (рис. 166). Сила тока в проводнике  $I = 2,0$  А. На проводник со стороны магнитного поля действует сила, модуль которой  $F = 0,40$  Н. Определите модуль и направление индукции магнитного поля.

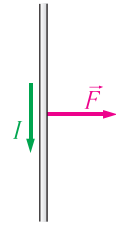


Рис. 166

4. Сила тока в прямолинейном проводнике, площадь поперечного сечения которого  $S = 0,10$  см<sup>2</sup>, составляет  $I = 3,9$  А. В однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 0,20$  Тл, на проводник действует максимально возможная для данного магнитного поля сила Ампера. Определите плотность вещества проводника, если модуль силы Ампера равен модулю силы тяжести, действующей на проводник.

5. Магнитное поле образовано наложением двух однородных магнитных полей, модули индукций которых  $B_1 = 0,03$  Тл и  $B_2 = 0,04$  Тл. Определите модуль индукции результирующего поля, если линии индукций суперпозирующих полей взаимно перпендикулярны.

6. Магнитное поле, модуль индукции которого  $B = 0,03$  Тл, образовано наложением двух однородных магнитных полей. Определите максимально возможное значение индукции первого поля, если модуль индукции второго поля  $B_2 = 0,02$  Тл.

7. Магнитное поле, модуль индукции которого  $B = 0,02$  Тл, образовано наложением двух однородных магнитных полей. Определите минимально возможное значение модуля индукции второго поля, если модуль индукции первого поля  $B_1 = 0,05$  Тл.



§ 29-1

## § 30. Сила Лоренца.

### Движение заряженных частиц в магнитном поле

*Поскольку электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц, то это означает, что магнитное поле, действуя на проводник с током, действует тем самым на каждую из этих частиц. Таким образом, силу Ампера можно рассматривать как результат сложения сил, действующих на отдельные движущиеся заряженные частицы. Как можно определить силу, действующую со стороны магнитного поля на заряженную частицу, движущуюся в этом поле?*

**Сила Лоренца.** Силу, которой магнитное поле действует на заряженную частицу, движущуюся в этом поле, называют *силой Лоренца* в честь выдающегося нидерландского физика Хендрика Антона Лоренца (1853–1928).

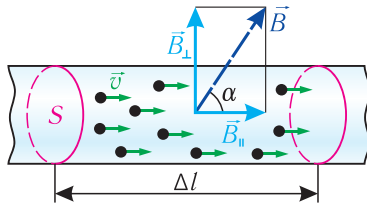


Рис. 167

Модуль силы Лоренца можно определить по формуле  $F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N}$ , где  $N$  — общее число свободных заряженных одинаковых частиц на прямолинейном участке проводника длиной  $\Delta l$  (рис. 167). Если модуль заряда одной частицы  $q$ , а модуль суммарного заряда всех частиц  $Nq$ , то согласно определению силы тока  $I = \frac{Nq}{\Delta t}$ , где  $\Delta t$  — промежуток времени, за который заряженная частица проходит участок проводника длиной  $\Delta l$ . Тогда

$$F_{\text{Л}} = \frac{BI\Delta l \sin \alpha}{N} = \frac{BNq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t N} = \frac{Bq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t}.$$

Поскольку  $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$  — модуль средней скорости упорядоченного движения заряженной частицы в стационарном\* электрическом поле внутри проводника, то формулу для определения модуля силы Лоренца можно записать в виде:

$$F_{\text{Л}} = Bqv \sin \alpha, \quad (30.1)$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и скорости  $\vec{v}$  упорядоченного движения заряженной частицы.

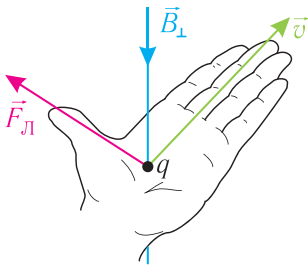


Рис. 168

Из формулы (30.1) следует, что сила Лоренца максимальна в случае, когда заряженная частица движется перпендикулярно направлению индукции магнитного поля ( $\alpha = 90^\circ$ ). Когда частица движется вдоль линии индукции поля ( $\alpha = 0^\circ$  или  $\alpha = 180^\circ$ ), сила Лоренца на неё не действует. Сила Лоренца зависит от выбора инерциальной системы отсчёта, так как в разных системах отсчёта скорость движения заряженной частицы может отличаться.

Направление силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, как и направление силы Ампера,

\* Электрическое поле, создаваемое и поддерживаемое источником тока в течение длительного промежутка времени и обеспечивающее постоянный электрический ток в проводнике, называют стационарным электрическим полем.

определяют по **правилу левой руки** (рис. 168): если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения частицы, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (против движения отрицательно заряженной частицы), то отогнутый на  $90^\circ$  в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на частицу силы Лоренца.

Сила Лоренца перпендикулярна как направлению скорости  $\vec{v}$  движения частицы, так и направлению индукции  $\vec{B}$  магнитного поля.

### От теории к практике

На рисунке 169 представлены направления индукции  $\vec{B}$  магнитного поля, скорости  $\vec{v}$  движения частицы в данный момент времени и силы Лоренца  $\vec{F}_L$ , действующей на частицу со стороны магнитного поля. Определите знак заряда частицы.

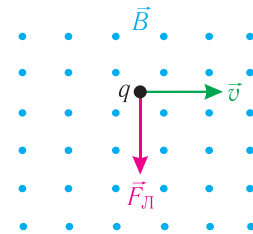


Рис. 169

**Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле.** Под действием силы Лоренца частицы, имеющие электрический заряд, движутся в магнитном поле по криволинейным траекториям. Причём если в данной инерциальной системе отсчёта направление скорости движения частицы перпендикулярно направлению индукции однородного магнитного поля ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ), то траекторией движения заряженной частицы является окружность (рис. 170).

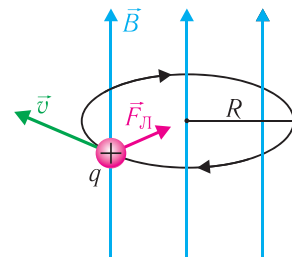


Рис. 170

Пусть в однородном магнитном поле, индукция которого  $\vec{B}$ , движется частица со скоростью  $\vec{v}$ , направленной перпендикулярно линиям индукции. Масса частицы  $m$  и заряд  $q$ . Так как сила Лоренца  $\vec{F}_L$  перпендикулярна скорости  $\vec{v}$  движения частицы (см. рис. 170), то эта сила изменяет только направление скорости, сообщая частице центростремительное ускорение, модуль которого согласно второму закону Ньютона:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{Bqv}{m}.$$



В результате частица движется по окружности, радиус которой можно определить из формулы  $a = \frac{v^2}{R}$ :

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{Bqv} = \frac{mv}{Bq}.$$

Период  $T$  обращения частицы, движущейся по окружности в однородном магнитном поле:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq} = \frac{2\pi m}{Bq}. \quad (30.2)$$

Как следует из выражения (30.2), период обращения частицы не зависит от модуля скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только модулем заряда частицы, её массой и значением индукции магнитного поля.

### От теории к практике

В однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 4,0$  мТл, перпендикулярно линиям индукции поля движется электрон. Чему равен модуль ускорения электрона, если модуль скорости его движения  $v = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ? Масса и модуль заряда электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг и  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл соответственно.



### Интересно знать

Поскольку сила Лоренца направлена под углом  $90^\circ$  к скорости движения заряженной частицы в каждой точке траектории (рис. 171), то работа этой силы при движении заряженной частицы в магнитном поле равна нулю. Поэтому кинетическая энергия частицы, движущейся в стационарном (не изменяющемся во времени) магнитном поле, не изменяется, т. е. стационарное магнитное поле нельзя использовать для ускорения заряженных частиц.

Увеличение кинетической энергии частицы, т. е. её разгон, возможно под действием электрического поля (в этом случае изменение кинетической энергии частицы равно работе силы поля). Поэтому в современных ускорителях (рис. 172) заряженных частиц электрическое поле используют для ускорения, а магнитное — для «формирования» траектории движения заряженных частиц.

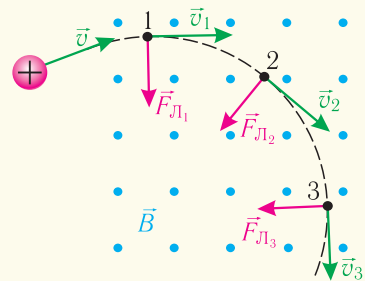


Рис. 171



Рис. 172



Силу, которой магнитное поле действует на заряженную частицу, движущуюся в этом поле, называют силой Лоренца

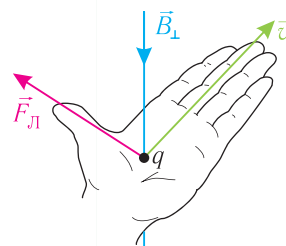
Модуль силы Лоренца:

$$F_L = B|q|v\sin\alpha$$

Если в данной инерциальной системе отсчёта скорость движения заряженной частицы перпендикулярна индукции однородного магнитного поля ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), то траекторией движения частицы является окружность

Период обращения частицы не зависит от скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только модулем её заряда, массой и значением индукции магнитного поля:

$$T = \frac{2\pi m}{B|q|}$$



Направление силы Лоренца определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения частицы, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (против движения отрицательно заряженной), то отогнутый на  $90^\circ$  в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на частицу силы Лоренца



1. Как определить модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся в нём заряженную частицу?
2. Как определяют направление силы Лоренца?
3. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле со скоростью, направленной перпендикулярно линиям индукции. По какой траектории движется частица?
4. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле?



**Пример решения задачи**

Электрон движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 12$  см со скоростью, модуль которой значительно меньше модуля скорости света. Определите модуль импульса электрона, если модуль индукции магнитного поля  $B = 0,020$  Тл.

Дано:

$$R = 12 \text{ см} =$$

$$= 0,12 \text{ м}$$

$$B = 0,020 \text{ Тл}$$

$$p = ?$$

Решение. По определению модуль импульса электрона  $p = mv$ , где  $m$  — масса электрона;  $v$  — модуль скорости его движения.

На электрон в магнитном поле действуют сила Лоренца и сила тяжести, модуль которой во много раз меньше модуля силы Лоренца. Поэтому действием силы тяжести на движущуюся в магнитном поле заряженную частицу можно пренебречь. Согласно второму закону Ньютона  $\frac{mv^2}{R} = Bev$ , откуда  $v = \frac{BeR}{m}$ , где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — модуль заряда электрона.

Следовательно,  $p = m \frac{BeR}{m} = BeR$ .

$$p = 0,020 \text{ Тл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,12 \text{ м} = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $p = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$

**Упражнение 22**

1. Электрон движется со скоростью, модуль которой  $v = 2,0 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ , перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля, модуль индукции которого  $B = 1,6$  мТл. Определите модуль силы, действующей на электрон в магнитном поле.

2. Электрон движется в однородном магнитном поле по окружности, радиус которой  $R = 8,0$  мм. Определите модуль индукции магнитного поля, если модуль скорости движения электрона  $v = 4,0 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

3. Пылинка движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 1,0$  Тл, перпендикулярно линиям индукции. Масса и заряд пылинки  $m = 0,80$  мг и  $q = 1,6$  нКл соответственно. Определите период обращения пылинки.

4. Электрон движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 2,0$  мТл, по окружности радиусом  $R = 2,0$  см. Определите кинетическую энергию электрона. Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

5. Определите, какую ускоряющую разность потенциалов должна пройти из состояния покоя частица, чтобы в однородном магнитном поле, модуль индукции которого  $B = 80$  мТл, на неё действовала сила Лоренца, модуль которой  $F = 20$  мкН. Масса частицы  $m = 12$  мг, её заряд  $q = 3,0$  мкКл. В магнитное поле частица влетает перпендикулярно линиям индукции.



## § 31. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции

После опытов Эрстеда и Ампера стало понятно, что электрические и магнитные поля имеют одни и те же источники: движущиеся электрические заряды. Это позволило предположить, что они каким-то образом связаны друг с другом. Фарадей был абсолютно уверен в единстве электрических и магнитных явлений. Вскоре после открытия Эрстеда в своём дневнике в декабре 1821 г. Фарадей записал: «Превратить магнетизм в электричество». На решение этой фундаментальной задачи ему понадобилось десять лет. После многочисленных экспериментов Фарадей сделал эпохальное открытие — замыкая и размыкая электрическую цепь одной катушки, он в замкнутой цепи другой катушки получил электрический ток. Наблюдаемое явление Фарадей назвал электромагнитной индукцией.

**Магнитный поток.** Индукция магнитного поля характеризует магнитное поле в конкретной точке пространства. Чтобы охарактеризовать магнитное поле во всех точках поверхности, ограниченной замкнутым контуром, ввели физическую величину, которую назвали *магнитным потоком* (потоком индукции магнитного поля).

**Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле,** — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля (рис. 173):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (31.1)$$

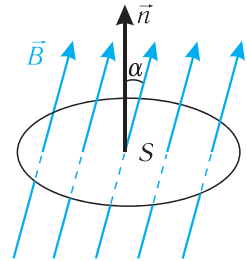


Рис. 173