

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?

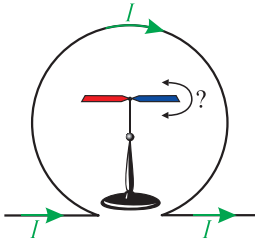


Рис. 161

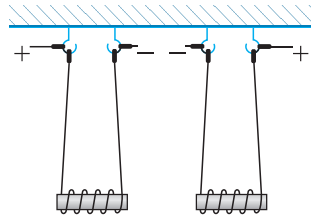


Рис. 162

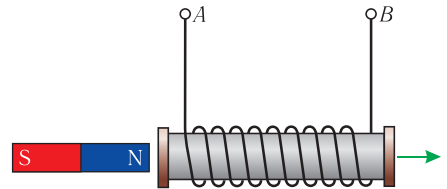


Рис. 163

## § 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*.

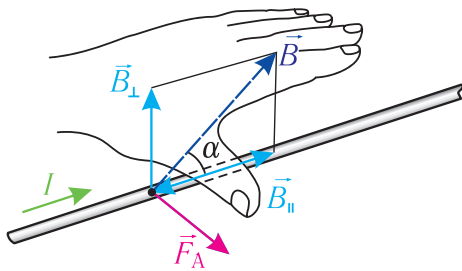


Рис. 164

**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:

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

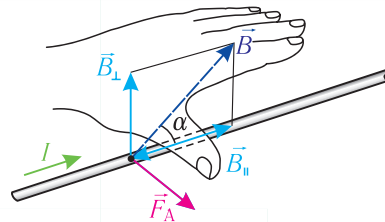
Принцип суперпозиции: если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (или движущимся 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:  $\alpha = 45^\circ$ .

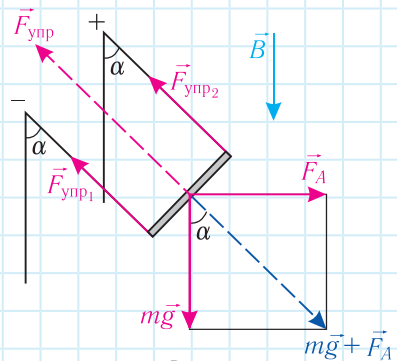


Рис. 165

### 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.

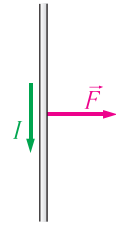


Рис. 166

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?*