

3. Магнитное поле

3.1. Вектор магнитной индукции. Сила Ампера

1. В основе магнитных явлений лежат два экспериментальных факта:

- 1) магнитное поле действует на движущиеся заряды,
- 2) движущиеся заряды создают магнитное поле.

2. Количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Зная вектор \vec{B} в некоторой точке пространства, можно определить магнитную силу, действующую в этой точке на движущийся заряд или на малый элемент проводника с током. Формулы, по которым могут быть рассчитаны магнитные силы, будут приведены ниже.

3. Для наглядного изображения магнитных полей используют линии индукции магнитного поля (магнитные линии). Эти линии проводят по тем же правилам, что и силовые линии поля \vec{E} : в каждой точке касательная к линии совпадает с вектором \vec{B} в данной точке. Направление магнитных линий совпадает с направлением вектора индукции \vec{B} . Линии магнитной индукции, как и силовые линии поля \vec{E} , непрерывны в пустом пространстве. Но, если линии поля \vec{E} начинаются и заканчиваются на зарядах, то линии поля \vec{B} могут быть замкнутыми.

4. В СИ магнитную индукцию выражают в тесла (Тл). Изучение физических законов, позволяющих найти магнитное поле \vec{B} заданной системы токов и движущихся зарядов, выходит за рамки школьного курса. Ограничимся описанием магнитного поля для некоторых специальных случаев.

5. Бесконечный прямой провод с током. В этом случае линии индукции представляют собой концентрические окружности (рис.3.1). Если буравчик вращать так, что он «ввинчивается» в направлении тока, то вращение его ручки укажет направление линий поля \vec{B} . С увеличением расстояния от провода величина вектора индукции уменьшается.

6. Круговой ток. Провод с током в виде кольца и линии магнитного поля \vec{B} этого тока показаны на рис. 3.2. Поле имеет вращательную симметрию относительно оси кольца. В непосредственной близости от кольца картина магнитных линий напоминает поле вблизи длинного прямого провода, что позволяет по правилу буравчика определять направление линий поля.

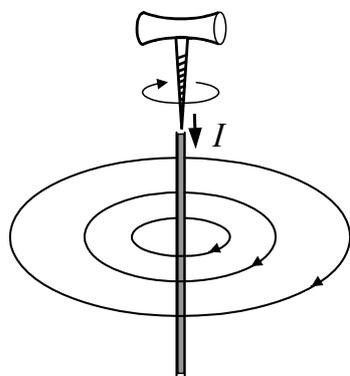


Рис. 3.1.

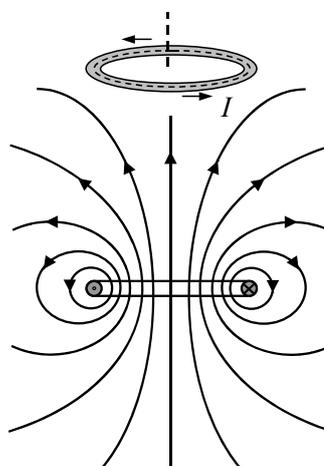


Рис. 3.2.

7. Закон Ампера определяет силу, действующую со стороны однородного магнитного поля с индукцией \vec{B} на прямолинейный участок провода длиной l , в котором протекает ток I . Величина силы Ампера выражается формулой

$$|\vec{F}| = IBl \sin \alpha$$

где α - угол между вектором индукции \vec{B} и направлением тока (направлением вектора \vec{l} , см. рис.3.3). Вектор силы \vec{F} перпендикулярен векторам \vec{B} и \vec{l} . Одно из двух возможных направлений \vec{F} можно определить по правилу левой руки (рис.3.4): когда линии индукции \vec{B} входят в ладонь левой руки, а четыре выпрямленных пальца указывают направление тока, отставленный в сторону большой палец указывает направление вектора силы \vec{F} .

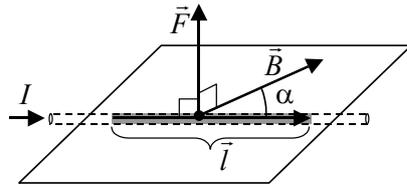


Рис. 3.3.

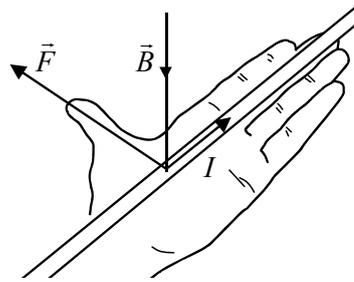


Рис. 3.4.

Для тех, кто знаком с понятием векторного произведения, заметим, что силу Ампера можно выразить формулой

$$\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}],$$

которая определяет и модуль и направление вектора \vec{F} .

Примеры решения задач

Пример 3.1. Докажите, что два прямых длинных параллельных провода, по которым текут токи в одном направлении, под действием сил Ампера притягиваются друг к другу.

Решение.

Нарисуем прямой провод, по которому течет ток I_1 (рис. 3.5). Магнитные линии этого тока представляют собой концентрические окружности. Направление линий определим при помощи правила буравчика. В соответствии с этим вектор индукции \vec{B} магнитного поля, созданного током I_1 в некоторой точке, через которую проходит провод с током I_2 , направлен в плоскость чертежа. Далее при помощи правила левой руки определяем направление силы Ампера, действующей на фрагмент провода с током I_2 со стороны магнитного поля, созданного током I_1 . Получаем, что сила, действующая на провод с током I_2 направлена к проводу с током I_1 – провода с одинаково направленными токами притягиваются.

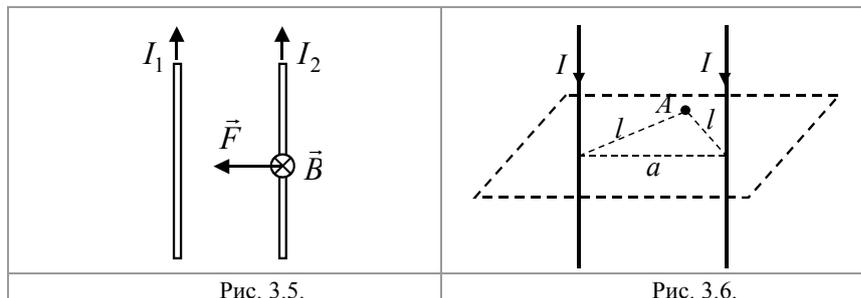


Рис. 3.5.

Рис. 3.6.

Пример 3.2. Два длинных прямых провода, по которым текут одинаковые токи в одном направлении, расположены параллельно на расстоянии a друг от друга (рис.3.6). Во сколько раз уменьшится модуль вектора индукции магнитного поля в точке A , удаленной от каждого провода на расстояние l , если ток в одном из проводов выключить?

Решение.

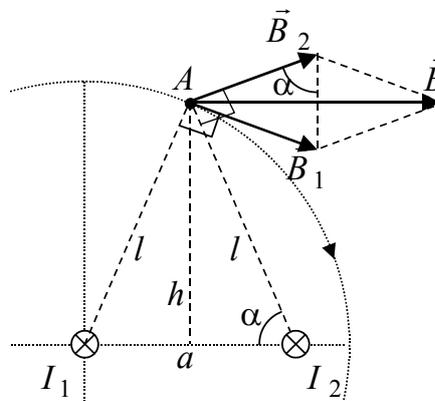


Рис. 3.7.

На рис. 3.7 в плоскости, перпендикулярной проводам, изображены векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 магнитного поля, созданного токами I_1 и I_2 , которые текут соответственно в левом и правом проводах. Вектор \vec{B}_1 направлен по касательной к ок-

ружности, которая представляет собой магнитную линию поля тока I_1 . Аналогично построен вектор \vec{B}_2 . Поскольку $I_1 = I_2 = I$ и точка A расположена на одинаковых расстояниях от проводов, то $B_1 = B_2$. Из рисунка следует, что $B = 2B_1 \sin \alpha$ и

$$\sin \alpha = \frac{h}{l} = \frac{\sqrt{l^2 - (a/2)^2}}{l}.$$

Следовательно,

$$\frac{B}{B_1} = 2\sqrt{1 - (a/2l)^2}.$$

Итак, если ток в одном из проводов выключить, то индукция магнитного поля в точке A уменьшится в $2\sqrt{1 - (a/2l)^2}$ раза.

Пример 3.3. Докажите, что сила Ампера, действующая со стороны однородного магнитного поля на замкнутый контур с током произвольной формы, равна нулю.

Решение

Мысленно разобьем замкнутый контур на малые элементы $\Delta \vec{l}_1, \Delta \vec{l}_2, \dots$. На i -ый элемент $\Delta \vec{l}_i$ со стороны магнитного поля действует сила Ампера

$$\Delta \vec{F}_i = I[\vec{B}, \Delta \vec{l}_i].$$

На весь замкнутый контур действует сила

$$\vec{F} = \sum \Delta \vec{F}_i = \sum I[\vec{B}, \Delta \vec{l}_i].$$

Поскольку магнитное поле однородное (одинаковое во всех точках), то величину \vec{B} можно вынести за знак суммы:

$$\vec{F} = I[\vec{B}, \sum \Delta \vec{l}_i].$$

Но для замкнутого контура $\sum \Delta \vec{l}_i = 0$. Следовательно, суммарная сила Ампера, действующая на контур, равна нулю.

Пример 3.4. В однородном горизонтальном магнитном поле подвешен на двух тонких гибких проволочках горизонтальный проводник, перпендикулярный полю. Ток через проводник начинают постепенно увеличивать и при токе $I = 10$ А проводник приходит в движение. Найдите индукцию магнитного поля B , если длина проводника $L = 10$ см, а его масса $m = 10$ г. На рисунке укажите направления тока и вектора индукции магнитного поля.

Решение.

Силы, действующие на проводник, показаны на рис. 3.8.

Выбрано такое направление тока, что сила Ампера F , действующая на проводник направлена вертикально вверх. Только в этом случае при достаточной величине тока нити ослабнут и проводник придет в движение. Запишем условие равновесия проводника:

$$F + 2T = mg,$$

где $F = IBL \sin 90^\circ = IBL$. Проводник начнет двигаться, когда $T = 0$, то есть при $IBL = mg$. Следовательно,

$$B = mg / IL = 0,1 \text{ Тл.}$$

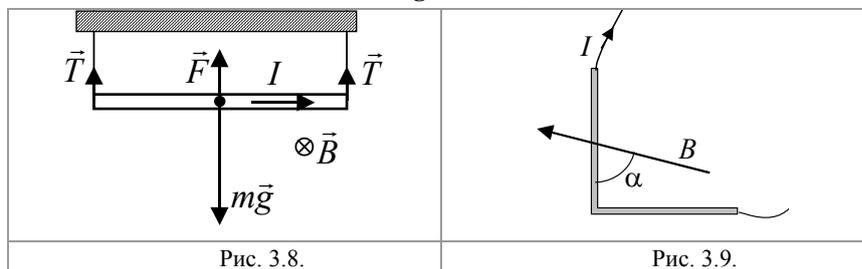


Рис. 3.8.

Рис. 3.9.

Пример 3.5. Проводящий стержень длиной $l = 4$ см согнули посередине под прямым углом и внесли в однородное магнитное поле индукции $B = 0,1$ Тл. Линии магнитной индукции параллельны плоскости, в которой лежит изогнутый стержень, и составляют угол $\alpha = 60^\circ$ с одной из его половинок (рис.3.9). Определите величину F силы, действующей на стержень со стороны магнитного поля при пропускании по стержню тока $I = 5$ А.

Решение.

Пользуясь правилом левой руки, определим направления сил Ампера, которые действуют на каждую половину стержня. Нетрудно убедиться, что на вертикальную половину действует сила, направленная «от нас» перпендикулярно плоскости чертежа. Модуль этой силы

$$F_1 = IB(l/2)\sin\alpha.$$

Сила, действующая на горизонтальную половину стержня направлена «на нас» перпендикулярно плоскости чертежа. Ее величина

$$F_2 = IB(l/2)\sin(90^\circ - \alpha).$$

Следовательно

$$F = \frac{BIl}{2} |\cos\alpha - \sin\alpha| \approx 3,7 \text{ мН}.$$

Пример 3.6. Треугольный проволочный контур помещен в однородное магнитное поле $B = 0,01$ Тл, вектор индукции которого параллелен стороне c треугольника (рис.3.10). При протекании в контуре тока $I = 1$ А на проводник a со стороны магнитного поля действует сила $F_a = 1$ мН. Определите силы F_b и F_c , действующие со стороны магнитного поля на проводники b и c . На рисунке укажите направления сил.

Решение.

Пользуясь правилом левой руки определим направления сил, действующих на стороны a и b треугольника: сила \vec{F}_a направлена «от нас» перпендикулярно плоскости чертежа, сила \vec{F}_b имеет противоположное направление (рис.3.10). Найдем модули векторов:

$$|\vec{F}_a| = IaB\sin\beta, \quad |\vec{F}_b| = IbB\sin\alpha, \quad |\vec{F}_c| = IcB\sin 180^\circ = 0.$$

По теореме синусов

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{a}{b}.$$

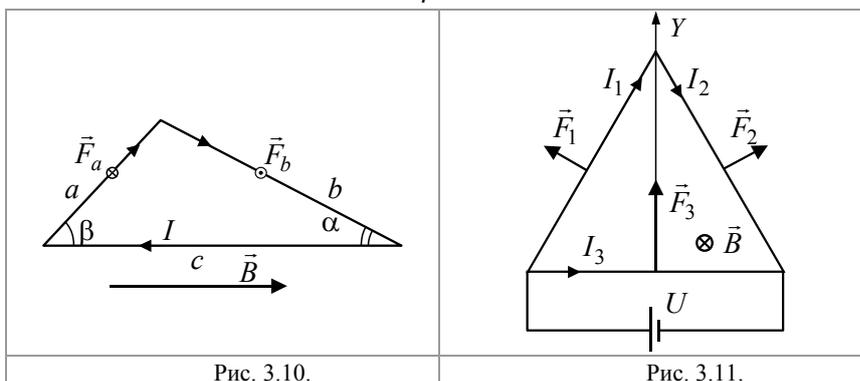


Рис. 3.10.

Рис. 3.11.

Следовательно, $F_b = F_a = 1$ мН. Результат можно получить проще, если предварительно доказать, что сумма сил Ампера, действующих со стороны однородного магнитного поля на замкнутый контур с током произвольной формы, равна нулю (см. пример 3.3).

Пример 3.7. Контур в виде равностороннего треугольника, изготовленный из проволоки с сопротивлением единицы длины $R_1 = 2$ Ом/м, помещен в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл, перпендикулярной плоскости контура. Двумя вершинами контур подключен к источнику постоянного напряжения $U = 1$ В. Найдите величину F силы, действующей на контур со стороны магнитного поля.

Решение.

Направления сил Ампера, действующих на стороны треугольника, найдем при помощи правила левой руки. Векторы этих сил перпендикулярны соответствующим сторонам треугольника (рис.3.11), а их модули равны:

$$F_1 = I_1Ba, \quad F_2 = I_2Ba, \quad F_3 = I_3Ba,$$

где a – длина стороны треугольника. По закону Ома

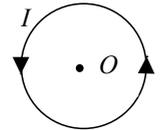
$$I_1 = I_2 = \frac{U}{2R_1a}, \quad I_3 = \frac{U}{R_1a}.$$

Следовательно, $F_1 = F_2$ и результирующая сила направлена вдоль оси Y (см. рис.3.11). Складывая проекции сил на эту ось, получим

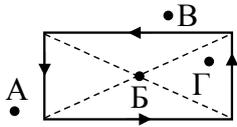
$$F = 2F_1 \sin(30^\circ) + F_3 = F_1 + F_3 = \frac{3BU}{2R_1} = 0,15 \text{ Н}.$$

3.1. Укажите ошибочные утверждения.

1. Вектор индукции магнитного поля \vec{B} в центре кругового витка, по которому течет ток I , как показано на рисунке, направлен «на нас».

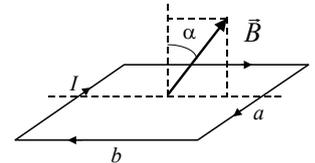


2. Если по прямоугольному проводящему контуру течет ток I , как показано на рисунке, а точки А, Б, В, Г лежат в одной плоскости с контуром, то вектор индукции магнитного \vec{B} поля этого тока в точках А и В, направлен «от нас», а в точках Б и Г – «на нас» перпендикулярно плоскости контура.



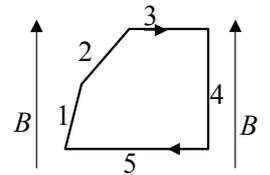
3. Вектор индукции однородного магнитного поля \vec{B} составляет угол α с нормалью к плоскости прямоугольного контура, по которому протекает ток I , и перпендикулярен противоположным сторонам (длиной a) контура. На стороны контура действуют силы Ампера:

$$F_a = IBa, F_b = IBb \sin \alpha.$$



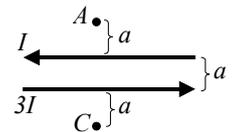
4. В однородном магнитном поле B находится контур с током. Стороны 1, 2 и 3 имеют одинаковые длины. Если F_1, \dots, F_5 – силы, действующие со стороны магнитного поля на соответствующие стороны рамки, то

$$F_5 > F_3 > F_2 > F_1 > F_4 = 0$$



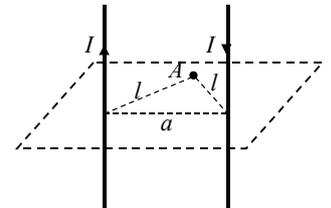
Задачи для самостоятельного решения

3.2. Величина индукции магнитного поля на расстоянии r от длинного прямого провода с током I определяется формулой $B = kI/r$, где k – постоянная. Два таких провода, по одному из которых течет ток I , а по другому ток $3I$ в противоположном направлении, расположены на расстоянии a друг от друга. Во сколько раз отличаются модули векторов магнитной индукции в точках А и С, обозначенных на рисунке?



3.3. Два длинных прямых провода, по которым текут одинаковые токи в противоположных направлениях, расположены параллельно на расстоянии a друг от друга. Во сколько раз уменьшится модуль вектора индукции магнитного поля в точке, удаленной от каждого провода на расстояние l , если ток в одном из проводов выключить?

3.4. Докажите, что сила Ампера, действующая со стороны однородного магнитного поля на криволинейный участок контура с током I , не зависит от формы участка и равна силе, действующей на прямолинейный проводник с током I , соединяющий концы рассматриваемого участка.



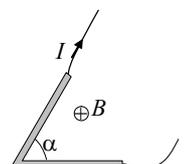
3.5. В горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией $B = 20$ мТл подвешен на двух тонких проволочках горизонтальный проводник, перпендикулярный полю. При пропускании по нему тока $I = 10$ А натяжение каждой проволочки изменилось на $\Delta T = 0,01$ Н. Определите длину проводника L .

3.6. По горизонтально расположенному медному проводнику с площадью поперечного сечения $S = 1$ мм² течет ток $I = 1$ А. Найдите минимальную величину B индукции магнитного поля, в которое нужно поместить проводник, чтобы сила тяжести уравновесилась силой Ампера.

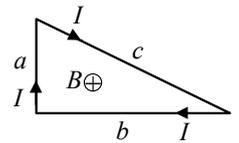
3.7. Прямой проводник, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции, при пропускании по нему тока $I = 1$ А приобрел ускорение $a = 2$ м/с². Площадь поперечного сечения проводника $S = 1$ мм², плотность материала проводника $\rho = 2500$ кг/м³. Определите величину B индукции магнитного поля. Всеми силами, кроме силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля, пренебречь.

3.8. Прямой проводник длиной $l = 50$ см находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,05$ Тл. Линии магнитной индукции составляют угол $\alpha = 60^\circ$ с проводником. С какой силой F магнитное поле будет действовать на проводник, если по нему пропустить ток $I = 1$ А?

3.9. * Проводящий стержень длиной $l = 4$ см согнули посередине под углом $\alpha = 60^\circ$ и внесли в однородное магнитное поле индукции $B = 0,01$ Тл. Линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости, в которой лежит изогнутый стержень. Определите величину F силы, действующей со стороны магнитного поля на стержень при пропускании по нему тока $I = 5$ А.



3.10. * Проволочный контур, имеющий форму прямоугольного треугольника, помещен в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура (см. рис.). При протекании в контуре тока I на проводник a со стороны магнитного поля действует сила $F_a = 3$ мН, на проводник b – сила $F_b = 4$ мН. Определите величину силы F_c , которая действует со стороны магнитного поля на проводник c . На рисунке укажите векторы сил.



3.11. Определите наибольшую F_{\max} и наименьшую F_{\min} величину силы, действующей на проводник длиной $l = 0,6$ м, по которому течет ток $I = 10$ А, при различных положениях проводника в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл.

3.12. ** Тонкий металлический стержень согнули в виде прямого угла со сторонами a , b , пропустили по стержню ток I и поместили в однородное магнитное поле с индукцией B . Определите максимальную и минимальную величину силы Ампера, которая будет действовать на стержень при его различной ориентации в магнитном поле. Считать, что вектор магнитной индукции лежит в одной плоскости с изогнутым стержнем.

3.2. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц

1. Силой Лоренца называют силу, действующую со стороны магнитного поля на движущийся заряд. Если заряд частицы q , а скорость \vec{V} , то величину силы Лоренца можно рассчитать по формуле

$$|\vec{F}| = |q| \cdot |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \alpha,$$

где α - угол между векторами \vec{V} и \vec{B} . Сила Лоренца перпендикулярна векторам \vec{V} и \vec{B} . Одно из двух возможных направлений вектора \vec{F} можно найти по правилу левой руки, если мысленно заменить движущийся заряд током: при $q > 0$ ток направлен вдоль \vec{V} , при $q < 0$ – против \vec{V} . Силу Лоренца можно выразить в виде векторного произведения

$$\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}].$$

Если кроме магнитного поля есть и электрическое поле напряженностью \vec{E} , то на движущийся точечный заряд со стороны полей действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{V}, \vec{B}].$$

Следует заметить, что именно эту силу принято называть силой Лоренца, а силу $\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}]$ называют магнитной составляющей силы Лоренца.

2. Отметим важное свойство магнитной составляющей силы Лоренца: работа этой силы на любом перемещении равна нулю, поскольку она всегда направлена перпендикулярно к скорости частицы.

Примеры решения задач

Пример 3.8. Электрон движется в области взаимно перпендикулярных полей – электрического с напряженностью $E = 10$ кВ/м и магнитного с индукцией $B = 0,1$ Тл. В некоторый момент времени вектор скорости электрона перпендикулярен векторам напряженности \vec{E} и индукции \vec{B} , а величина скорости $V = 10^5$ м/с. Определите величину a ускорения электрона в этот момент.

Решение

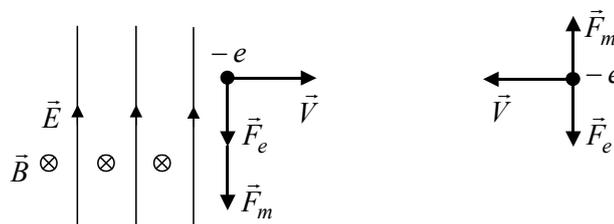


Рис. 3.12.

На рис. 3.12 показаны векторы полей \vec{E} , \vec{B} , скорости электрона \vec{V} и действующих на него сил магнитной \vec{F}_m и электрической \vec{F}_e . Вектор индукции направлен «от нас» перпендикулярно плоскости чертежа, вектор напряженности направлен на рисунке вертикально вверх. В соответствии с условием задачи следует рассмотреть два случая: вектор скорости электрона направлен вправо или влево. Электрическая составляющая силы Лоренца $\vec{F}_e = q\vec{E} = -e\vec{E}$ не зависит от скорости электрона и в обоих случаях направлена против вектора напряженности (заряд электрона отрицательный). Направление магнитной составляющей силы Лоренца \vec{F}_m определим при помощи правила левой руки. В одном случае эта сила направлена так же, как и электрическая, а в другом – противоположно \vec{F}_e . Учитывая, что

$$F_m = eVB \sin 90^\circ = eVB,$$

получим

$$F = ma = \frac{e}{m} |E \pm VB|, \quad a = \frac{e}{m} |E \pm VB|.$$

Подставляя численные значения, найдем $a = 3,52 \cdot 10^{15} \text{ м/с}^2$ или $a = 0$.

Пример 3.9. Протон движется в магнитном поле с индукцией $B = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ перпендикулярно линиям индукции. Сколько оборотов сделает протон за время $t = 0,01 \text{ с}$?

Решение

На рис.3.13 показаны векторы скорости протона \vec{V} , индукции магнитного поля \vec{B} и силы Лоренца \vec{F} , действующей на протон. Эти векторы взаимно перпендикулярны и их направления удовлетворяют правилу левой руки. Величина скорости протона остается постоянной, поскольку магнитная сила не совершает работу и, следовательно, не изменяет кинетическую энергию протона. Таким образом, протон движется с постоянной по величине скоростью под действием силы, которая также постоянна по модулю и в любой момент времени перпендикулярна вектору скорости. Это позволяет заключить, что протон движется по окружности. Проектируя векторные величины на ось X , проходящую через центр окружности, получим

$$ma_{\text{ц.с.}} = eVB \sin 90^\circ,$$

где $a_{\text{ц.с.}} = V^2/R$ - центростремительное ускорение, R - радиус окружности, V - скорость протона, m - его масса. Период обращения протона равен

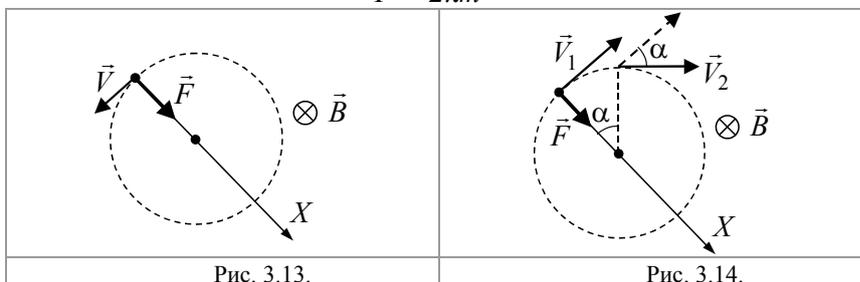
$$T = \frac{2\pi R}{V}.$$

Из этих уравнений получим

$$T = \frac{2\pi m}{eB}.$$

Примечательно, что период обращения не зависит от скорости частицы. Число оборотов, совершенных протоном за время t , равно

$$N = \frac{t}{T} = \frac{eBt}{2\pi m} \approx 960.$$



Пример 3.10. Заряженная частица движется со скоростью $V = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля $B = 3 \text{ мТл}$. Когда частица прошла путь $L = 0,5 \text{ мм}$, вектор ее скорости повернулся на угол $\alpha = 5^\circ$. Чему равно отношение q/m заряда частицы к ее массе?

Решение

Из рис. 3.14 видно, что, когда вектор скорости повернется на угол α , радиус-вектор, проведенный от центра окружности к частице, также повернется на угол α . Пройденный за это время частицей путь относится к длине окружности как угол α относится к полному углу:

$$\frac{L}{2\pi R} = \frac{\alpha}{360^\circ},$$

где R - радиус окружности. Чтобы найти R , запишем второй закон Ньютона, проектируя векторные величины на ось X , направленную от частицы к центру окружности:

$$\frac{mV^2}{R} = qVB.$$

Из этих уравнений после преобразований получим ответ:

$$\frac{q}{m} = \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) \frac{\pi V}{BL} = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Пример 3.11. Два ядра изотопов гелия ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле и движутся по окружностям радиусов R_1 и R_2 соответственно. Определите отношение R_1/R_2 .

Решение

Ядра ${}^3_2\text{He}$ и ${}^4_2\text{He}$ имеют одинаковые заряды ($q_1 = q_2 = 2e$), а отношение масс ядер $m_1 / m_2 = 3/4$. Рассматривая движение ядра ${}^3_2\text{He}$, запишем теорему об изменении кинетической энергии

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} = q_1 U$$

при ускорении ядра разностью потенциалов U , а также второй закон Ньютона

$$\frac{m_1 V_1^2}{R_1} = q V_1 B.$$

при движении ядра с постоянной скоростью V_1 по окружности в однородном магнитном поле. Из этих уравнений найдем радиус окружности

$$R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_1 U}{q_1}}.$$

Аналогичное соотношение можно записать для радиуса R_2 окружности, по которой движется ядро ${}^4_2\text{He}$. Следовательно

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \approx 0,87.$$

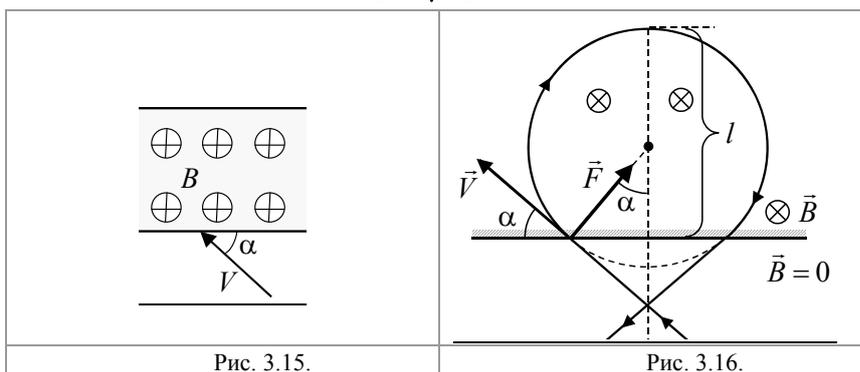


Рис. 3.15.

Рис. 3.16.

Пример 3.12. Электрон влетает со скоростью $V = 1,2 \cdot 10^7$ м/с в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,01$ Тл перпендикулярно линиям индукции под углом $\alpha = 60^\circ$ к границе раздела (см. рис.3.15, вектор магнитной индукции «входит» в плоскость чертежа). На какое максимальное расстояние l удалится электрон, двигаясь в магнитном поле, от границы раздела?

Решение

При помощи правила левой руки определим направление силы Лоренца, действующей на электрон (следует учесть, что заряд электрона отрицательный). После этого становится понятным, в какую сторону разворачивается вектор скорости электрона в магнитном поле и теперь можно изобразить траекторию его движения (см. рис.3.16). Из рисунка видно, что

$$l = R + R \cos \alpha.$$

Радиус окружности найдем из уравнения

$$\frac{mV^2}{R} = eVB.$$

После преобразований получим

$$l = \frac{2mV}{Be} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \approx 1 \text{ см.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Сила Лоренца

3.13. С каким максимальным ускорением может двигаться электрон в магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл? Скорость электрона $V = 10^6$ м/с. Считать, что на электрон действует сила только со стороны магнитного поля.

3.14. С какой силой F действует магнитное поле с индукцией $B = 0,3$ Тл на частицу с зарядом $q = 0,6$ нКл, движущуюся в данный момент времени со скоростью $V = 100$ м/с под углом $\alpha = 30^\circ$ к линиям индукции магнитного поля?

3.15. Электрон движется в магнитном поле с индукцией $B = 10^{-5}$ Тл. В некоторый момент времени электрон движется перпендикулярно вектору \vec{B} со скоростью $V = 10^3$ м/с. Определите отношение магнитной составляющей силы Лоренца к силе тяжести, действующих на электрон.

3.16. Однородное электрическое поле с напряженностью $E = 3 \cdot 10^6$ В/м перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией $B = 1$ Тл. В некоторый момент времени скорость электрона направлена вдоль вектора E и равна $v = 4 \cdot 10^6$ м/с. Определите величину F полной силы, действующей на электрон в этот момент.

3.17. Электрон движется в электромагнитном поле, в котором векторы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля имеют одинаковые направления, а их модули соответственно равны $E = 3 \cdot 10^3$ В/м, $B = 0,2$ Тл. В некоторый момент времени вектор скорости электрона составляет угол $\alpha = 30^\circ$ с векторами напряженности и индукции, а величина скорости $V = 4 \cdot 10^4$ м/с. Определите величину a ускорение электрона в этот момент.

Движение по окружности

3.18. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Определите среднюю величину кругового тока I , создаваемого движением электрона.

3.19. С каким ускорением a движется свободный электрон по окружности радиуса $R = 1$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл?

3.20. Протон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией $B = 6,3 \cdot 10^{-4}$ Тл. Укажите на рисунке направления векторов скорости протона и магнитной индукции. Найдите частоту n обращения протона по окружности.

3.21. Импульс электрона, движущегося по окружности в однородном магнитном поле, равен $p = 6,4 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с. Индукция магнитного поля $B = 0,2$ мТл. Найдите радиус окружности R .

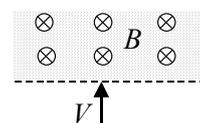
3.22. Во сколько раз отличаются периоды обращения протонов, движущихся по окружностям в однородных магнитных полях с индукцией $B_1 = 0,1$ Тл и $B_2 = 0,2$ Тл?

3.23. Определите отношение T_p/T_e периодов обращения протона и электрона по окружностям в одном и том же магнитном поле.

3.24. * Вектор импульса электрона, движущегося в плоскости, перпендикулярной вектору индукции однородного магнитного поля, повернулся на угол $\alpha = 1$ рад за время $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. Определите величину B индукции магнитного поля.

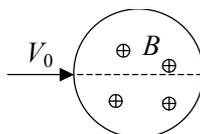
3.25. * Заряженная частица движется со скоростью $V = 5 \cdot 10^6$ м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля $B = 5$ мТл. Когда она прошла путь $l = 3$ мм, вектор ускорения частицы повернулся на угол $\alpha = 30^\circ$. Чему равно отношение q/m заряда частицы к ее массе?

3.26. * Протон влетает в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,625$ Тл. При этом вектор \vec{V} его скорости перпендикулярен плоской границе поля и линиям магнитной индукции. Найдите время τ движения протона в области, занятой полем.



3.27. * Частица массы m , несущая заряд q и движущаяся со скоростью V , налетает на неподвижную стенку перпендикулярно ее поверхности. В этот момент включается однородное магнитное поле с индукцией B , параллельное плоскости стенки. Стенка абсолютно упруго отражает частицу. Найдите расстояние l между точками 1-го и 2-го отражений.

3.28. * Частица с удельным зарядом q/m попадает в область однородного магнитного поля B , перпендикулярного вектору скорости частицы V_0 и ограниченного цилиндрической поверхностью радиуса r . Чему равен модуль вектора индукции магнитного поля, если частица отклонилась магнитным полем на угол $\alpha = 90^\circ$? Вектор начальной скорости частицы направлен вдоль радиуса цилиндрической поверхности.



3.29. * Первоначально покоившийся электрон ускоряется однородным электрическим полем на отрезке $d = 1$ см, попадает в однородное магнитное поле и движется в нем по дуге окружности радиуса $R = 5$ см. Во сколько раз сила, действовавшая на электрон со стороны электрического поля, больше силы, действующей на него со стороны магнитного поля?

3.30. * Заряженная частица влетела в однородное магнитное поле под некоторым углом α к линиям индукции. Радиус винтовой траектории частицы оказался в $n = 2\pi$ раз меньше расстояния между ее витками. Определите α .

3.31. ** Электрон вылетает со скоростью $v = 10^6$ м/с из некоторой точки области, где созданы однородные электрическое и магнитное поля с напряженностью $E = 500$ В/м и индукцией $B = 0,1$ Тл. Векторы \vec{E} и \vec{B} направлены вдоль оси x , а вектор \vec{v} начальной скорости электрона составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с этой осью. Сколько оборотов сделает электрон до смены направления его движения вдоль оси x ?

ОТВЕТЫ

3.1.

3.2. $B_C / B_A = 5$

3.3. Уменьшится в a/l раза

3.4.

3.5. $L = 2\Delta T / IB = 10$ см

3.6. $B = \rho Sg / I = 89$ мТл

3.7. $B = \rho Sa / I = 5$ мТл

3.8. $F = IB \sin \alpha \approx 0,022$ Н

3.9. $F = IB \sin(\alpha/2) = 1$ мН

3.10. $F_c = \sqrt{F_a^2 + F_b^2} = 5$ мН

3.11. $F_{\max} = BIl = 0,06$ Н, $F_{\min} = 0$

3.12. $F_{\max} = IB\sqrt{a^2 + b^2}$, $F_{\min} = 0$

3.13. $a = eVB / m \approx 1,8 \cdot 10^{17}$ м/с²

3.14. $F = qVB \sin \alpha = 0,009$ мкН

3.15. $F_m / mg = eVB / mg = 1,76 \cdot 10^8$

3.16. $F = e\sqrt{E^2 + (vB)^2} = 8 \cdot 10^{-13}$ Н

3.17. $a = (e/m)\sqrt{E^2 + (VB \sin \alpha)^2} = 8,8 \cdot 10^{14}$ м/с²

3.18. $I = e^2 B / 2\pi m \approx 0,45$ нА

3.19. $a = R(eB/m)^2 \approx 3 \cdot 10^{16}$ м/с²

3.20. $n = \frac{eB}{2\pi m} \approx 9,6 \cdot 10^3$ с⁻¹

3.21. $R = p / eB = 2$ см

3.22. $\frac{T_1}{T_2} = \frac{B_2}{B_1} = 2$

3.23. $\frac{T_p}{T_e} = \frac{m_p}{m_e} \approx 1,9 \cdot 10^3$

3.24. $B = \alpha m / e\tau \approx 0,28$ мТл

3.25. $\frac{q}{m} = \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) \frac{\pi V}{Bl} \approx 1,7 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

3.26. $\tau = \pi m / eB \approx 52$ нс

3.27. $l = 2mV / qB$

3.28. $B = \frac{V_0}{(q/m)r} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{V_0}{(q/m)r}$

3.29. $F_{эл} / F_m = R / 2d = 2,5$

3.30. $\alpha = \arctg(2\pi/n) = 45^\circ$

3.31. $N = \frac{vB \cos \alpha}{2\pi E} \approx 16$