

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Заочная физико-техническая школа**

**ФИЗИКА**

**Магнитное поле**

Задание №6 для 10-х классов

(2013 – 2014 учебный год)



г. Долгопрудный, 2014

*Составитель:* В.И. Чивилёв, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задание №6 для 10-х классов (2013 – 2014 учебный год), 2014, 16 с.

**Дата отправления заданий по физике и математике – 20 апреля 2014 г.**

Составитель:

**Чивилёв Виктор Иванович**

Подписано 18.03.14. Формат 60×90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 450. Заказ №56-з.

Заочная физико-техническая школа  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)

ООО «Печатный салон ШАНС»

Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141700.

ЗФТШ, тел./факс (495) 408-51-45 – **заочное отделение,**

тел./факс (498) 744-63-51 – **очно-заочное отделение,**

тел. (498) 744-65-83 – **очное отделение.**

*e-mail: [zftsh@mail.mipt.ru](mailto:zftsh@mail.mipt.ru)*

**Наш сайт: [www.school.mipt.ru](http://www.school.mipt.ru)**

© ЗФТШ, 2014

## §1. Магнитное поле

Опыты с проводниками, по которым течёт ток, навели исследователей на мысль, что кроме электрического поля существует ещё и так называемое *магнитное поле*. Магнитное поле можно обнаружить по его действию на проводники с током и движущиеся заряды. Напомним, что электрическое поле обнаруживается по его действию на покоящиеся и движущиеся заряды. Характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции*  $\vec{B}$  (вектор индукции магнитного поля). Вектор  $\vec{B}$  можно ввести по силовому действию на проводники с током или движущиеся заряды одним из трёх способов:

- 1) по действию магнитного поля на движущийся заряд;
- 2) по действию магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током;
- 3) по действию магнитного поля на рамку с током.

По этой причине вектор  $\vec{B}$  есть силовая характеристика поля. Введём понятие вектора  $\vec{B}$  через действие поля на рамку с током.

Пусть есть достаточно маленькая плоская рамка произвольной формы, по которой пропускается ток (рис. 1). Опыт показывает, что на такую рамку, помещённую вблизи некоторой точки магнитного поля, действует момент сил, зависящий от ориентации рамки в магнитном поле.

За направление вектора  $\vec{B}$  в том месте (точке), где расположена рамка, принимается направление нормали (перпендикуляра) к плоскости рамки при таком положении рамки, когда момент сил, действующих на рамку, равен нулю. Из двух нормалей, которые можно провести к плоскости рамки, выбирается та, которая связана с направлением тока в рамке правилом буравчика (правого винта). Для рамки на рис. 1 направление тока связано правилом буравчика с нормалью, направленной от читателя за плоскость рисунка. Опыт подтверждает, что определённое таким образом направление вектора  $\vec{B}$  не зависит от формы рамки.

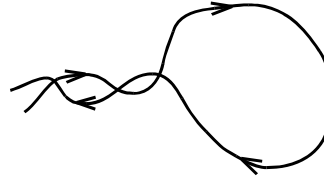


Рис. 1

Введём теперь модуль вектора магнитной индукции. Если плоскость рамки параллельна вектору  $\vec{B}$ , то на рамку действует максимальный момент сил  $M_{\max}$ , пропорциональный току  $I$  в рамке и её площади  $S$  независимо от формы рамки:

$$M_{\max} = BIS. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $B$  называется модулем вектора магнитной индукции в той точке поля, вблизи которой расположена рамка.

Независимость введённого вектора  $\vec{B}$  от формы рамки показывает, что  $\vec{B}$  есть характеристика магнитного поля и приведённое выше определение для вектора магнитной индукции корректно.

Из формулы (1) видно, что  $B$  в системе СИ измеряется в  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ . Единица магнитной индукции в системе СИ получила

специальное название – *тесла* (обозначается Тл). Итак,  $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ .

Выразим единицу магнитной индукции через основные единицы системы

СИ. Поскольку  $\text{Н} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$ , то  $\text{Тл} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}$ .

Иногда говорят о направлении магнитного поля, подразумевая под этим направление вектора магнитной индукции.

Графически магнитные поля изображают с помощью *линий магнитной индукции* (магнитных силовых линий). Это воображаемые линии в пространстве, касательные к которым во всех точках совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$  в этих

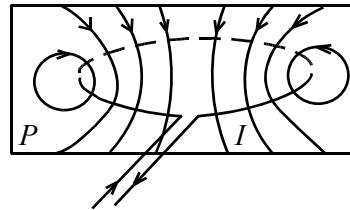


Рис. 2

точках. За направление силовых линий берут направление вектора  $\vec{B}$ . Ясно, что силовые линии магнитного поля (как и электрического) не могут пересекаться, так как в противном случае в точке пересечения направление вектора магнитной индукции будет носить неоднозначный характер, что не соответствует действительности. Опыт показывает, что силовые линии магнитного поля замкнутые, то есть нет магнитных зарядов, на которых силовые линии начинаются или заканчиваются. На рис. 2 для кругового витка с током показана картина силовых линий магнитного поля в плоскости  $P$ , перпендикулярной плоскости витка и проходящей через его диаметр. Стрелки на силовых линиях указывают их направление.

Для обозначения на рисунке магнитного поля, направленного за плоскость рисунка, используется крестик в кружке:  $\otimes$ . Поле, направ-

ленное из-за плоскости рисунка (на читателя), обозначают точкой в кружке:  $\odot$ .

Как же получить, создать магнитное поле? Оказывается, что не только постоянные магниты, но и токи в проводниках или даже движущиеся заряды создают магнитное поле. Это и есть источники магнитного поля. А как быть, если присутствует одновременно несколько источников поля?

Из опыта следует, что для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции: *для каждой точки пространства вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля, создаваемого несколькими источниками поля, равен сумме векторов магнитной индукции полей, создаваемых каждым источником в отдельности:*

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots$$

Магнитное поле называется *однородным*, если векторы  $\vec{B}$  во всех его точках одинаковы. В других случаях поле называется *неоднородным*.

Несколько слов о магнитных полюсах. Пусть у постоянного магнита (намагниченного тела) силовые линии магнитного поля выходят из некоторой части поверхности магнита, располагаясь достаточно густо в месте выхода. Это место называется *северным полюсом* магнита. То место у магнита, где сгустившиеся силовые линии магнитного поля входят в магнит, называется *южным полюсом* магнита. Силовые линии магнитного поля выходят из северного полюса магнита, идут вне магнита, входят в южный полюс магнита и идут внутри магнита к его северному полюсу. Северный полюс обозначается буквой  $N$ , южный — буквой  $S$ .

Названия полюсов имеют исторические корни: северным полюсом назван тот конец магнитной стрелки (у компаса), который показывал на географический север.

Во внешнем магнитном поле постоянный магнит в виде стержня с полюсами на концах (магнитная стрелка) старается расположиться вдоль поля так, чтобы собственное поле внутри магнита совпадало по направлению с внешним полем.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что северный магнитный полюс Земли находится вблизи южного географического полюса Земли, а южный магнитный полюс Земли находится в районе северного географического. И это действительно так!

## §2. Закон Био – Савара – Лапласа

В 1820 году французские учёные Ж. Био и Ф. Савар исследовали магнитные поля, создаваемые в воздухе прямолинейным током, круговым током, катушкой с током и т. д. На основании многочисленных опытов они пришли к следующим выводам:

- магнитная индукция в произвольной точке поля зависит от расположения этой точки по отношению к проводу с током;
- магнитная индукция зависит от конфигурации (формы и размеров) провода с током;
- во всех случаях модуль вектора индукции магнитного поля, создаваемого тонким проводом с током, пропорционален силе тока.

Био и Савар пытались получить общий закон, позволяющий вычислить магнитную индукцию в каждой точке поля, создаваемого электрическим током, текущим в проводнике любой формы. Но сделать им это не удалось, и они обратились к известному французскому математику, физики и астроному П. Лапласу. Лаплас учёл векторный характер магнитного поля и высказал важную гипотезу о том, что индукция  $\vec{B}$  в каждой точке магнитного поля любого проводника с током представляет собой векторную сумму индукций  $\vec{\Delta B}_i$  магнитных полей, создаваемых каждым достаточно малым участком проводника (элементом тока):  $\vec{B} = \sum_i \vec{\Delta B}_i$ . Этим Лаплас

предположил, что при наложении магнитных полей справедлив принцип суперпозиции, то есть принцип независимого действия магнитных полей, создаваемых несколькими источниками полей.

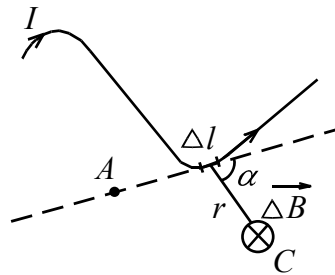


Рис. 3

Обобщив результаты экспериментов Био и Савара, Лаплас пришёл к выводу, что модуль вектора магнитной индукции  $\vec{\Delta B}$  поля, создаваемого элементом тока в исследуемой точке  $C$  (рис. 3), пропорционален силе тока  $I$ , длине элемента тока  $\Delta l$ , синусу угла  $\alpha$  между направлением тока и направлением на исследуемую точку  $C$  и обратно пропорционален квадрату расстояния  $r$  до точки  $C$ . Направлен же вектор  $\vec{\Delta B}$  перпендикулярно плоскости, проходящей через элемент тока и исследуемую точку, причём направление тока в элементе тока и направление поля в исследуемой точке  $C$  связаны правилом буравчика: при движении острия буравчика в направлении тока вращение рукоятки буравчика показывает направление поля в точке  $C$ .

Остриё буравчика помещается, естественно, вблизи элемента тока. На рис. 3 поле в точке  $C$  направлено за плоскость чертежа и обозначено поэтому крестиком.

Приведём для справки, но не для запоминания, полученную Лапласом формулу, выражающую закон Био – Савара – Лапласа:

$$|\vec{\Delta B}| = k \frac{I \Delta l}{r^2} \sin \alpha.$$

Здесь коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от выбора системы единиц. В системе СИ  $k = 10^{-7}$  ед. СИ.

Следует заметить, что правило буравчика при установлении связи между направлением тока и поля можно применять и в обратном порядке, то есть вращать буравчик так, чтобы его остриё, помещённое в исследуемую точку, двигалось по направлению вектора индукции магнитного поля, а конец рукоятки двигался в направлении тока. Проверьте это для случая, изображённого на рис. 3. Такой подход особенно удобен для витка с током при нахождении направления магнитного поля внутри витка (рис. 4). То, что в законе Био – Савара – Лапласа модуль вектора индукции магнитного поля, создаваемого элементом тока в некоторой точке, пропорционален силе тока и длине элемента тока, легко запомнить, так как это следует непосредственно из принципа суперпозиции магнитных полей. Действительно, увеличим ток в элементе тока в два раза. Тогда модуль вектора магнитной индукции поля, создаваемого в некоторой точке этим элементом, увеличится тоже в два раза, не изменив направления, поскольку элемент тока с током  $2I$  можно представить как два плотно прижатых друг к другу элемента тока с токами  $I$  в каждом и применить принцип суперпозиции для полей, создаваемых этими двумя элементами. Аналогичные рассуждения будут и при увеличении тока в любое число раз. Это доказывает, что модуль вектора магнитной индукции пропорционален току. Похожие рассуждения можно провести и в отношении длины элемента тока.

Следует отметить одно полезное следствие из закона Био – Савара – Лапласа. Поле, создаваемое элементом тока в произвольной

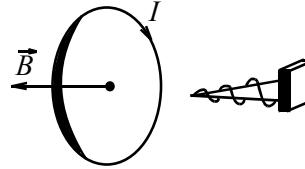


Рис. 4

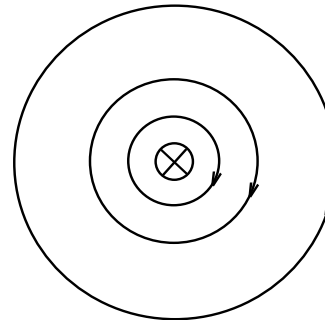


Рис. 5

точке  $A$  (рис. 3) на оси элемента, равно нулю, т. к. для этой точки  $\sin \alpha = 0$ . Это легко запомнить, если учесть, что при попытке найти направление поля в точке  $A$  с помощью правила буравчика мы столкнёмся с неопределённостью направления поля, что указывает на то, что поле в этой точке не имеет направления, то есть отсутствует.

Попробуйте применить правило буравчика в этом случае.

**Пример.** Рассмотрим поле сколь угодно длинного прямолинейного провода с током. Пользуясь законом Био – Савара – Лапласа, нетрудно догадаться, что силовые линии магнитного поля будут представлять собой окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных оси провода. Центры окружностей будут на оси провода. Величина индукции поля должна убывать с увеличением расстояния до провода. Направление силовых линий определяется по правилу буравчика, остриё которого в данном случае удобно направить по току. На рис. 5 ток в проводе направлен перпендикулярно плоскости чертежа, за плоскость чертежа и обозначен крестиком.

В качестве самостоятельного упражнения полезно объяснить с помощью закона Био – Савара – Лапласа и правила буравчика ход магнитных силовых линий на всех рисунках школьного учебника.

**Задача 1.** По бесконечно длинному прямолинейному тонкому проводу  $AKD$  течёт ток (рис. 6). В некоторой точке  $C$  индукция магнитного поля, создаваемого этим током, равна  $B$ . Как изменится магнитная индукция в точке  $C$ , если провод с этим током займёт положение  $AKD_1$ ?

**Решение.** Каждый из полубесконечных участков  $AK$  и  $KD$  создаёт в точке  $C$  поле с ин-

дукцией  $\frac{1}{2}B$ , направленное туда же, что и поле

от всего проводника  $AD$  (перпендикулярно плоскости чертежа, за плоскость чертежа). Поле от полубесконечного участка  $KD_1$  в точке  $C$  равно нулю, т. к. точка  $C$  находится на продолжении участка  $KD_1$ . Следовательно, поле в точке  $C$  от участка  $AKD_1$  такое же, как и поле от участка  $AK$ , то есть после изгиба провода вектор магнитной индукции поля в точке  $C$  своего направления не изменит, но его модуль уменьшится в два раза и станет равен  $\frac{1}{2}B$ .

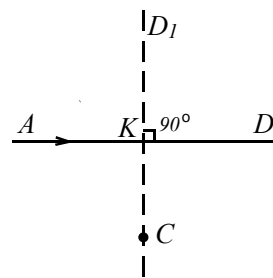


Рис. 6

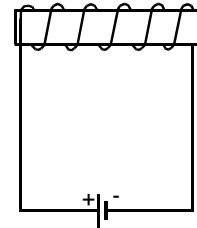


Рис. 7



**Задача 2.** На железный стержень намотана катушка и подключена к источнику тока (рис. 7). Определите расположение полюсов у такого магнита.

**Решение.** Ток по виткам катушки идёт по часовой стрелке, если смотреть вдоль стержня справа. По правилу буравчика поле внутри катушки направлено влево. Северный полюс электромагнита расположен слева, а южный – справа.

### §3. Закон Ампера

*Закон Ампера:* на прямолинейный отрезок проводника с током  $I$  и длиной  $l$ , помещённый в однородное магнитное поле с индукцией  $B$ , действует сила Ампера, модуль которой равен

$$F = BIl \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором  $\vec{B}$  и отрезком проводника. Направление силы Ампера определяется по *правилу левой руки*: расположим левую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока; тогда отогнутый на  $90^\circ$  большой палец укажет направление силы, которое должно быть строго перпендикулярным как проводнику, так и вектору  $\vec{B}$ .

Заметим, что в формуле (2)  $B \sin \alpha = B_\perp$  есть модуль перпендикулярной к проводнику составляющей  $B_\perp$  вектора индукции  $\vec{B}$  (вектор  $\vec{B}$  удобно разложить по двум взаимно перпендикулярным направлениям: вдоль проводника и перпендикулярно проводнику). Поэтому (2) можно переписать в виде:

$$F = B_\perp l. \quad (3)$$

Видно, что составляющая вектора индукции вдоль проводника не влияет на величину силы.

Если магнитное поле неоднородное, то формулу (2) можно применять к отрезкам достаточно малой длины.

**Задача 3.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,02$  Тл расположено проволочное полукольцо длиной  $L = 3$  см, по которому течёт ток  $I = 0,1$  А. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости полукольца (рис. 8). Найдите силу, действующую на полукольцо со стороны магнитного поля.

**Решение.** Проведём ось  $y$  через концы полукольца, а ось  $x$  – перпендикулярно оси  $y$  через центр кривизны полукольца (рис. 9). Выделим мысленно небольшой участок  $AB$  полукольца длиной  $\Delta l_i$  (рис. 9). На него действует сила  $F_i = BI\Delta l_i$ . Проекция этой силы на ось  $x$  равна

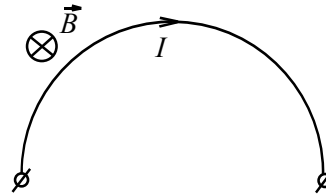


Рис. 8

$F_{ix} = BI \Delta l_i \cos \alpha_i$ . Так как  $\Delta l_i \cos \alpha_i = \Delta y_i$  — есть проекция участка  $AB$  на ось  $y$ , то  $F_{ix} = BI \Delta y_i$ .

Сила  $\vec{F}$ , действующая на всё полукольцо, равна сумме всех сил, действующих на отдельные его элементы, а проекция этой силы на ось  $x$  равна

$$F_x = \sum_i F_{ix} = BI \sum_i \Delta y_i.$$

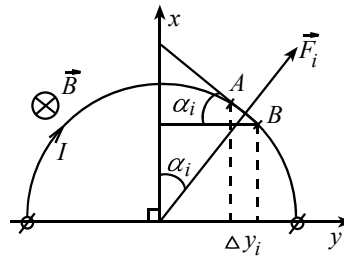


Рис. 9

Так как сумма проекций всех участков

полукольца на ось  $y$  равна  $\sum \Delta y_i = 2R$ , то  $F_x = 2BIR$ , где  $R = \frac{L}{\pi}$  — радиус полукольца.

Проекция  $\vec{F}$  на ось  $y$ , равная сумме проекций сил на ось  $y$  для всех элементов полукольца, равна нулю. Поэтому сила  $\vec{F}$ , действующая на полукольцо, равна по модулю  $F_x$ :

$$F = 2BIR = \frac{2BIL}{\pi} \approx 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

#### §4. Сила Лоренца

На движущийся в магнитном поле со скоростью  $v$  заряд  $q$  действует сила Лоренца, абсолютная величина которой

$$F_L = |q| v B \sin \alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — угол между векторами скорости  $\vec{v}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$ . Сила Лоренца действует на заряд в направлении, перпендикулярном векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Здесь тоже применимо правило левой руки, если считать, что движение положительного заряда эквивалентно току, идущему в прямолинейном участке проводника в направлении вектора скорости положительного заряда, а движение отрицательного заряда эквивалентно току, идущему в направлении, противоположном направлению вектора скорости отрицательного заряда.

Поскольку  $B \sin \alpha = B_{\perp}$  есть модуль перпендикулярной к направлению скорости составляющей вектора индукции  $\vec{B}$ , то  $F_L = |q| v B_{\perp}$ .

Выражение для силы Лоренца (4) можно вывести из формулы (2) и

наоборот, поскольку сила Ампера есть сумма всех сил Лоренца, действующих на движущиеся заряды, участвующие в создании тока.

Если кроме магнитного поля есть ещё и электрическое поле, то на движущийся заряд со стороны электрического поля действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E},$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряжённости электрического поля в той точке, в которой находится заряд в данный момент. Векторная сумма сил, действующих на заряд со стороны электрического и магнитного полей, есть сила, с которой электромагнитное поле действует на заряд. Эта суммарная сила часто называется силой Лоренца, а её составляющая, определяемая формулой (4), называется магнитной частью (составляющей) силы Лоренца. Мы же в дальнейшем, как и в ныне действующем школьном учебнике, под силой Лоренца будем подразумевать силу, даваемую формулой (4).

**Задача 4.** В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B$  частице массой  $m$  с зарядом  $q$  ( $q > 0$ ) сообщают скорость  $v$ , направленную перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить траекторию движения частицы.

**Решение.** Действующая на частицу сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы в любой момент движения и поэтому не совершает работу над частицей. Значит, кинетическая энергия частицы не изменяется. Следовательно, не изменяется модуль её скорости. Модуль силы Лоренца  $\vec{F}$  остаётся тоже постоянным, поскольку постоянны модули скорости и магнитной индукции.

Под действием силы, постоянной по модулю и направленной перпендикулярно скорости, частица имеет постоянное по модулю направленное перпендикулярно скорости ускорение  $a$  (рис. 10). Это значит, что частица движется по дуге окружности

радиуса  $R$ , причём  $a = \frac{v^2}{R}$ . По второму закону Ньютона  $F = ma$ , то есть

$qvB = m \frac{v^2}{R}$ . Отсюда радиус дуги окружности, по которой движется

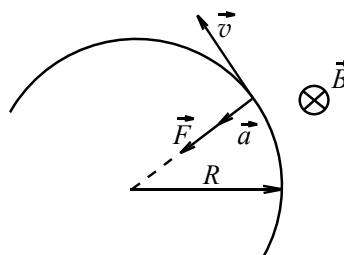


Рис. 10

частица,  $R = \frac{mv}{qB}$ .

**Задача 5.** Электрон со скоростью  $v = 10^9$  см/с влетает в область однородного магнитного поля с индукцией  $B = 10^{-3}$  Тл (рис. 11). Направление скорости перпендикулярно линиям индукции поля. Определите максимальную глубину  $h$  проникновения электрона в область магнитного поля. Угол падения  $\alpha = 30^\circ$ . Отношение заряда электрона к его массе

$$\gamma = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

**Решение.** Электрон будет двигаться в магнитном поле с постоянной скоростью  $v$  по дуге окружности радиуса  $R$  (рис. 12), который найдётся из условия равенства центростремительной силы и силы Лоренца:

$$\frac{mv^2}{R} = evB.$$

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $m$  – его масса. Глубина проникновения

$$h = R - R \sin \alpha = \frac{v}{\gamma B} (1 - \sin \alpha) \approx 28 \text{ мм.}$$

**Задача 6.** В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B$  частице массой  $m$  с зарядом  $q$  ( $q > 0$ ) сообщают скорость  $v$ , составляющую острый угол  $\alpha$  с направлением поля. Определить траекторию движения частицы.

**Решение.** Направим ось  $y$  прямоугольной системы координат  $xyz$  вдоль поля.

Пусть скорость  $v$  была сообщена частице в точке  $A_1$  (рис. 13). При движении

частицы сила Лоренца, перпендикулярная вектору скорости, не совершает работы, поэтому кинетическая энергия частицы и модуль её скорости остаются неизменными.

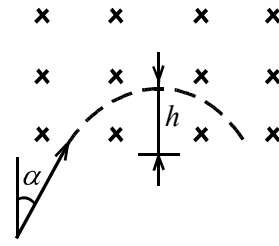


Рис. 11

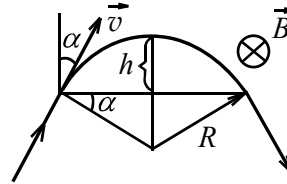


Рис. 12

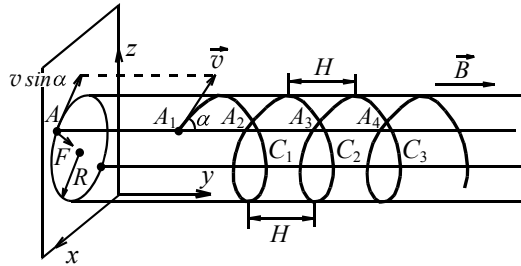


Рис. 13

Поскольку сила Лоренца должна быть перпендикулярна вектору магнитной индукции, то её проекция на ось  $y$  равна нулю. По этой причине проекция скорости частицы на ось  $y$  остаётся постоянной и равной  $v \cos \alpha$ . Так как эта проекция и модуль скорости не меняются при движении частицы, то угол между скоростью и вектором  $\vec{B}$  остаётся неизменным и равным  $\alpha$ . Теперь ясно, что модуль силы Лоренца остаётся постоянным и равным  $F = qvB \sin \alpha$ .

Рассмотрим, как движется проекция частицы на плоскость  $xz$ , то есть точка  $A$ . Модуль проекции скорости частицы на эту плоскость постоянен и равен  $v \sin \alpha$ . Поскольку сила Лоренца  $F$  параллельна плоскости  $xz$  и направлена перпендикулярно скорости движения точки  $A$  по этой плоскости, то в плоскости  $xz$  движение в точке  $A$  выглядит как движение частицы со скоростью  $v \sin \alpha$  под действием центростремительной силы  $F$  с ускорением  $\frac{1}{R}(v \sin \alpha)^2$  по окружности радиуса  $R$ . По

второму закону Ньютона  $qvB \sin \alpha = m \frac{(v \sin \alpha)^2}{R}$ . Отсюда

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}.$$

Из всего сказанного выше видно, что наша частица участвует как бы в двух движениях: равномерном движении по окружности радиуса  $R$  со скоростью  $v \sin \alpha$  в плоскости  $xz$ , перпендикулярной силовым линиям поля, и в движении вдоль поля с постоянной скоростью  $v \cos \alpha$ . Траектория результирующего движения представляет собой винтовую линию с шагом  $H$ . Точки  $A_1, A_2, A_3, \dots$  винтовой линии, лежащие на одной и той же силовой линии поля, отстоят друг от друга на величину шага  $H$ .

Найдём  $H$ . Один виток  $A_1 C_1 A_2$  частица проходит за время  $T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$ , перемещаясь вдоль поля из точки  $A_1$  в точку  $A_2$  на расстоянии  $H = Tv \cos \alpha$ . Учтя найденные ранее выражения для  $T$  и  $R$ , получаем  $H = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{qB}$ . Итак, частица движется по винтовой линии с

радиусом  $R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$  и шагом  $H = \frac{2\pi mv \cos \alpha}{qB}$ , как бы навиваясь на магнитные силовые линии.

### Контрольные вопросы

1. Определите направление силы, действующей на провод с током  $I$ , помещённый в магнитное поле (рис. 14).
2. Провод с током (направление тока указано крестиком) помещён между полюсами магнита (рис.15). На провод действует сила  $F$  со стороны магнитного поля. Укажите расположение полюсов магнита.
3. Два параллельных провода притягиваются. Как направлен ток в правом проводе (рис. 16), если в левом ток направлен вверх?

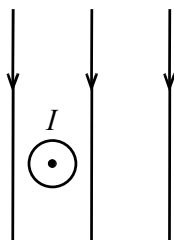


Рис. 14

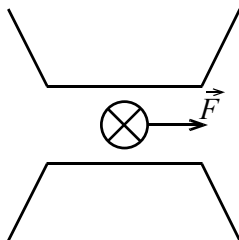


Рис. 15

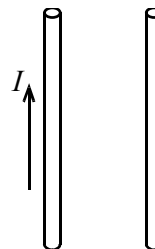


Рис. 16

4. Найти в точке  $O$  (рис. 17) индукцию магнитного поля (направление и модуль), созданного током  $I$ , текущим в бесконечно длинном тонком проводе с петлёй в форме дуги окружности радиусом  $R$ . Известно, что индукция магнитного поля в центре кругового витка радиуса  $R$  с током такой же силы равна  $B = 0,006 \text{ Тл}$ .

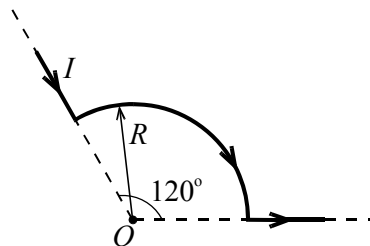


Рис. 17

5. Можно или нет намагнитить стальной шарик?
6. Можно или нет получить магнит только с одним северным полюсом, отпилив конец с южным полюсом?
7. Определите полярность батарейки  $B$ , если стрелка компаса уста-

новились так, как показано на рис. 18.

8. Определите полярность аккумулятора  $A$ , если сердечники электромагнитов отталкиваются (рис. 19).

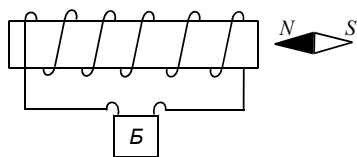


Рис. 18

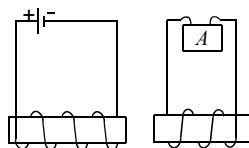


Рис. 19

9. На рис. 20 показан участок траектории частицы, движущейся в постоянном магнитном поле. Определите знак заряда частицы.

10. Электрон движется в постоянном во времени неоднородном магнитном поле. Как будет изменяться модуль скорости электрона?

11. По какой траектории движется заряженная частица, которой в однородном магнитном поле сообщили скорость под углом  $\alpha \neq 0$  и  $\alpha \neq 90^\circ$  к силовым линиям поля?

12. Ток в горизонтальном проводе течёт с юга на север. Куда направлена сила, действующая на провод со стороны магнитного поля Земли? Учтите, что северный магнитный полюс Земли находится вблизи южного географического полюса Земли. Опыт проводится вблизи Москвы.

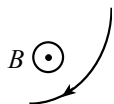


Рис. 20

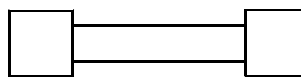


Рис. 21

13. В одной коробке находится источник, а в другой лампочка, которая питается от источника с помощью двух проводов (рис. 21). Как с помощью магнитной стрелки и вольтметра постоянного тока с клеммами «+» и «-» определить где источник, а где лампочка? Коробки непрозрачные.

### Задачи

1. Проводник массой  $m = 2\text{ г}$  и длиной  $L = 20\text{ см}$  висит в горизонтальном положении на двух нитях. Перпендикулярно проводнику направлено горизонтальное однородное магнитное поле с индукцией  $B = 20\text{ мТл}$ . При какой силе тока через проводник (пропущенного в

соответствующем направлении) сила натяжения каждой нити увеличится в 1,5 раза?

2. Горизонтально расположенный стержень массой  $m = 0,1 \text{ кг}$  лежит на горизонтальных рельсах перпендикулярно им. Силы давления стержня на оба рельса одинаковы. Расстояние между рельсами  $l = 50 \text{ см}$ . Магнитное поле с индукцией  $B = 80 \text{ мТл}$  направлено вертикально. Коэффициент трения скольжения стержня о рельсы  $\mu = 0,2$ . Какой минимальный ток нужно пропустить по стержню, подводя ток через рельсы, чтобы стержень сдвинулся?

3. Заряженная частица проходит ускоряющую разность потенциалов  $U = 8 \text{ кВ}$ , затем попадает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 300 \text{ мкТл}$  и движется по дуге окружности радиусом  $R = 100 \text{ см}$  в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Найдите отношение заряда частицы к её массе.

4. Перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B = 0,02 \text{ Тл}$  направлено однородное электрическое поле с напряжённостью  $E = 2 \text{ кВ/м}$ . Перпендикулярно обоим полям движется электрон по прямолинейной траектории. Найдите скорость электрона.

5. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1 \text{ мТл}$  по винтовой линии радиусом  $R = 1 \text{ см}$  и шагом  $H = 5 \text{ см}$ . Найдите скорость электрона.

6. Электрон имеет скорость  $v$ , направленную под углом  $\alpha$  к силовым линиям однородного магнитного поля. При какой минимальной индукции магнитного поля электрон будет возвращаться на одну и ту же силовую линию поля, сместившись вдоль нее на  $L$ ? Модуль заряда электрона равен  $e$ , его масса  $m$ .

7\*. Внутри длинного соленоида вдали от его торцов магнитное поле однородно и его индукция равна  $B$ . Один из торцов соленоида закрывают картонным диском, на котором с другой стороны от соленоида помещают круговой виток из проволоки так, что центр витка совпадает с осью соленоида (рис. 22). Найдите силу натяжения проволоки витка, если его радиус равен  $R$ , а сила тока в витке  $I$ . Трением витка о картон пренебречь.

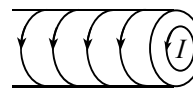


Рис. 22