

# Магнитные явления

В. МОЖАЕВ

**КАК** ИЗВЕСТНО, ОСНОВНЫМ фундаментальным (а значит, полученным из экспериментов) законом в электростатике является закон Кулона – закон электрического взаимодействия двух точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Силовой характеристикой электростатического поля служит вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . (Заметим, что из закона Кулона вытекает основная теорема электростатики – теорема Гаусса, которая устанавливает связь между потоком напряженности электрического поля через замкнутую поверхность с величиной заряда, находящегося внутри этой поверхности.)

Если проводить параллель между электростатикой и магнитостатикой, то можно сказать, что в основе магнитостатики лежит закон Ампера – закон магнитного взаимодействия двух токов, текущих в малых отрезках проводников, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .

Магнитное поле, подобно электрическому, является объективной реальностью и в то же время служит средством описания взаимодействия движущихся заряженных частиц. Если мы знаем величину индукции магнитного поля в некоторой точке пространства в данный момент времени, то мы знаем величину и направление силы, которая подействовала бы на движущуюся заряженную частицу в этой пространственно-временной точке.

Для определения индукции магнитного поля, создаваемого электрическим током, можно использовать закон

Био – Савара. Согласно этому закону, малый отрезок проводника  $\Delta l$  (рис.1), по которому течет ток  $I$  (отрезку приписывается направление тока), создает в точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $r$  от  $\Delta l$  ( $\Delta l \ll r$ ), магнитное поле с индукцией, равной

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}.$$

Здесь  $\alpha$  – угол между  $\vec{\Delta l}$  и радиусом-вектором  $\vec{r}$ , проведенным от отрезка к точке,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Направление вектора  $\vec{\Delta B}$  определяется правилом буравчика: если буравчик ввинчивать по направлению тока, то направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением индукции магнитного поля. Полная индукция  $\vec{B}$  магнитного поля, создаваемого в точке  $M$  всем проводником с током, равна векторной сумме индукций магнитного поля от всех участков проводника.

Проиллюстрируем сказанное на примере. Найдем индукцию магнитного поля протяженного прямого провода с током  $I$  на расстоянии  $a$  от провода. Длину провода будем считать много большей  $a$ .

Для определения индукции магнитного поля вблизи провода воспользуемся законом Био – Савара. На рисунке 2 бесконечный прямой провод с током  $I$  расположен вдоль оси  $Z$ . На расстоянии  $z$  от начала координат выберем небольшой отрезок провода

длиной  $dz$  и запишем выражение для величины индукции магнитного поля в точке  $A$ , создаваемого элементом тока  $dz$ :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dz \sin \alpha}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cos \beta \cdot dz}{r^2}.$$

Сделаем замену переменных: перейдем от  $z$  к  $\beta$ . Поскольку  $z/a = \tan \beta$ , то, продифференцировав обе части этого равенства, получим  $dz = a d\beta / \cos^2 \beta$ . После замены переменной найдем индукцию в точке  $A$ , просуммировав по всему проводу:

$$B = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{\mu_0 I \cos \beta \cdot a d\beta}{4\pi r^2 \cos^2 \beta} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \int_0^{\pi/2} \cos \beta d\beta = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}. (*)$$

Вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля в точке  $A$  направлен от нас перпендикулярно плоскости рисунка. Линии магнитной индукции представляют собой семейство окружностей, симметричных относительно провода.

Полученный результат остается справедливым для бесконечно длинного провода и любого конечного расстояния  $a$ , либо для провода конечной длины, но при условии, что расстояние  $a$  много меньше длины провода. Если проводник с током не является прямолинейным, то формула для  $B$  остается справедливой при расстояниях  $a$ , много меньших радиуса кривизны проводника.

А теперь разберем несколько конкретных задач.

**Задача 1.** Два длинных параллельных медных провода диаметром  $d = 2$  мм расположены на расстоянии  $L = 5$  см друг от друга. В обоих проводах текут одинаковые токи со средней скоростью движения электронов проводимости  $v = 0,1$  см/с. Атомная масса меди  $A = 63,6$  г/моль, плотность меди  $\rho = 8,9$  г/см<sup>3</sup>, постоянная Авогадро  $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>. Можно считать, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

Определите силу Ампера, действующую на элемент провода с током длиной  $l = 1$  м. Вычислите электростатическую силу, которая действовала бы на электроны проводимости в проводе длиной  $l = 1$  м со стороны электронов проводимости другого провода без учета положительных

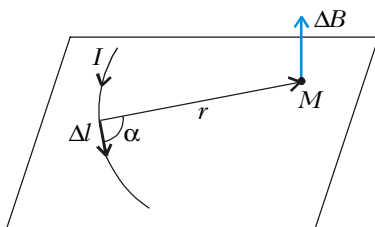


Рис. 1

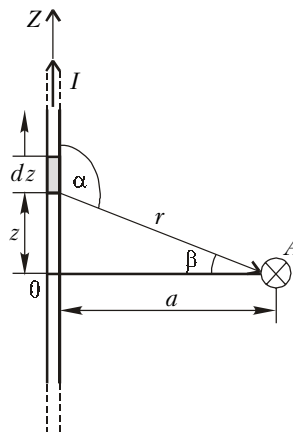


Рис. 2