

Еще раз о магнитной силе

Е. РОМИШЕВСКИЙ

В СТАТЬЕ «ЭТА ЗАГАДОЧНАЯ МАГНИТНАЯ СИЛА» (см. «Квант» №3 за 1999 г.) говорилось о свойствах электромагнитной силы Лоренца. Здесь же мы обсудим, как взаимодействуют между собой ее электрическая и магнитная составляющие и какова природа магнитной силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле.

Рассмотрим сначала взаимодействие магнитной и электрической сил на примере поступательного движения проводящего бруска в однородном магнитном поле (рис.1). Пусть магнитное поле \vec{B} направлено перпендикулярно вектору постоянной скорости \vec{v} и плоской грани ad прямоугольного бруска со сторонами a , b , d . Будем считать, что брусок имеет форму «плоского конденсатора»: сторона d много меньше сторон a и b .

Как известно, в узлах жесткой кристаллической решетки металла расположены положительные ионы, а свободные электроны равномерно рас-

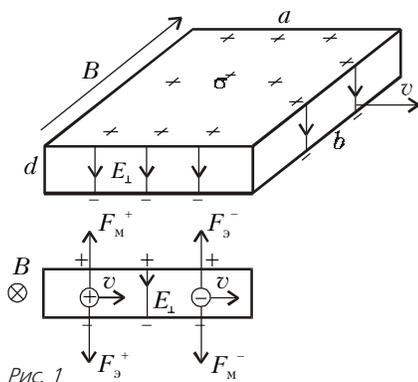


Рис. 1

пределены по его объему. При движении бруска в магнитном поле на положительные заряды бруска e^+ и отрицательные заряды e^- действуют магнитные силы, равные по величине $F_M = evB$ и направленные в противоположные стороны. Под действием магнитной силы свободные электроны смещаются вниз и создают на верхней и нижней поверхностях бруска избыточные заряды с поверхностными плотностями σ^+ и σ^- . Это приводит к тому, что внутри бруска, как в плоском конденсаторе, возникает однородное электрическое кулоновское поле \vec{E}_\perp , вызывающее электрическую силу, которая компенсирует действие магнитной силы в объеме бруска. Магнитная сила как бы вызывает электрическую силу, чтобы себя уравновесить:

$$F_M = F_3, \quad evB = eE_\perp,$$

и

$$E_\perp = vB.$$

В результате такой «плоский конденсатор» оказывается заряженным до разности потенциалов

$$\Delta\phi = E_\perp d = vBd.$$

В целом брусок остается электрически нейтральным, электрические заряды возникают только на поверхностях бруска и в равных количествах ($\sigma^+ = -\sigma^-$).

При равномерном движении бруска в однородном магнитном поле полная сила, действующая на брусок, естественно, равна нулю. Однако при ускорении бруска, т.е. при увеличении скорости \vec{v} , или при вхождении в

область \vec{B} увеличивающегося магнитного поля брусок будет испытывать со стороны магнитного поля силу торможения. При этом будут, соответственно, увеличиваться и напряженность электрического поля \vec{E}_\perp , и поверхностные плотности зарядов σ^+ и σ^- .

Заметим, что равномерно движущийся в магнитном поле проводящий брусок представляет собой прообраз главного элемента самых мощных и самых распространенных источников электрической энергии, электродвижущая сила \mathcal{E} которых определяется именно магнитной силой: $\mathcal{E} = vBd$.

Пусть теперь наш металлический брусок abd неподвижен и имеет омическое сопротивление R . Подключим к его граням bd (рис.2) батарею с электродвижущей силой \mathcal{E}_0 так, чтобы обеспечить в бруске постоянный по любому сечению bd электрический ток $I = \mathcal{E}_0/R$. Поскольку разность потенциалов между сечениями bd равна \mathcal{E}_0 , в объеме бруска установится однородное электрическое поле \vec{E} , параллельное сторонам a . Под влиянием этого поля свободные электроны металла будут дрейфовать вправо со средней скоростью v_d , создавая электрический ток

$$I = \frac{\mathcal{E}_0}{R} = nev_d bd = nev_d S,$$

где n – плотность свободных электронов, e – их заряд, а $S = bd$ – площадь сечения. Нужно отметить, что направление движения электронов со скоростью v_d противоположно направлению электрического поля \vec{E} и направлению электрического тока I . Положительно заряженные ионы, образу-

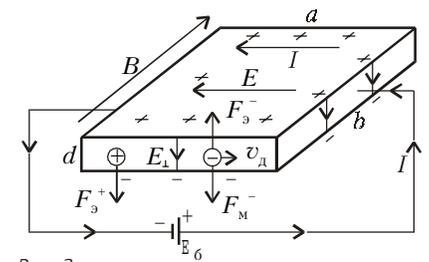


Рис. 2

щие жесткую кристаллическую решетку, естественно, при этом покоятся.

Если внешнее магнитное поле отсутствует, то единственным магнитным полем будет собственное магнитное поле \vec{B}_c , возникающее при движении свободных электронов, которым мы можем пренебречь. Теперь включим внешнее магнитное поле \vec{B} , точно такое же, как и в предыдущем случае. Под действием возникшей магнитной силы, равной $F_m = ev_d B$, движущиеся со скоростью v_d электроны будут отклоняться вниз и создавать избыток отрицательных зарядов на нижней поверхности бруска и положительных на его верхней поверхности. Так будет продолжаться до тех пор, пока не возникнет поперечное электрическое поле \vec{E}_\perp , направленное вниз и компенсирующее действие магнитной силы, — точно так же, как это было в случае равномерного движения бруска в однородном магнитном поле. Принципиальное отличие заключается в том, что при наличии электрического тока в движении участвуют только свободные электроны. В стадио-

нарном состоянии, которое достигается очень быстро после включения внешнего магнитного поля, электроны в среднем снова движутся горизонтально вдоль сторон a , а внутри металлического бруска появляется поперечное электрическое поле $E_\perp = \sigma/\epsilon_0$, наблюдаемое в системе отсчета, связанной с кристаллической решеткой металла. Это поле своим действием уравновешивает магнитную силу, действующую на движущиеся электроны, и создает электрическую силу F_\perp^+ , направленную вниз и действующую на неподвижные положительные ионы (на кристаллическую решетку металла).

Вот таким образом магнитная сила, действующая на электроны, передается сплошному металлическому бруску. Величину этой воспринимаемой бруском силы можно записать так:

на один положительный ион действует сила, равная

$$F_\perp = eE_\perp = ev_d B,$$

на все же ионы бруска, а их $N = nabd$, где n — число ионов в единице объема (равное плотности свободных

электронов), будет действовать сила, равная

$$\begin{aligned} F_N &= ev_d B \cdot nabd = \\ &= nev_d bd \cdot B \cdot a = Iba. \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать, эта сила в точности равна сумме всех сил Лоренца, действующих со стороны магнитного поля на движущиеся электроны. Силу, действующую на проводник длиной a , по которому течет ток I и который помещен в однородное магнитное поле B , называют силой Ампера. А физическое явление возникновения разности потенциалов между поверхностями проводника (нашего бруска), когда по нему течет электрический ток и проводник находится в магнитном поле, называется *эффектом Холла*. Эту разность потенциалов

$$\Delta\varphi = E_\perp d = v_d B d = \frac{1}{neS} IBd$$

можно измерить непосредственно с помощью вольтметра. Заметим, что эффект Холла был открыт в 1879 году, за много лет до открытия электрона Томсоном (1897 г.).