

постоянных магнитов обусловлены существующими в них микротоками. О природе и характере этих микротоков Ампер ничего не мог сказать, так как в то время учение о строении вещества находилось еще в начальной стадии. Лишь после открытия электрона и выяснения строения атомов и молекул, т. е. спустя почти 100 лет, гипотеза Ампера была блестяще подтверждена и легла в основу современных представлений о магнитных свойствах вещества. Гипотетические микротоки Ампера получили простое и наглядное истолкование: они связаны с движением электронов в атомах, молекулах и ионах.

## § 14.2. Закон Ампера

1. В предыдущем параграфе мы говорили о том, что проводники с током создают вокруг себя магнитное поле и действуют на находящиеся около них постоянные магниты. В свою очередь магнит-

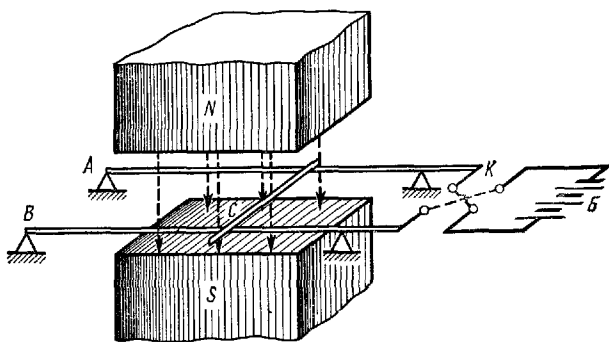


Рис 14.6

ное поле действует на проводники с током. Для доказательства этого сделаем следующий опыт. Два параллельных металлических стержня  $A$  и  $B$  поместим между полюсами магнита  $N$  и  $S$  (рис. 14.6). Легкий металлический стержень  $C$  опирается своими концами на стержни  $A$  и  $B$  и может свободно перемещаться вдоль них. Стержни  $A$  и  $B$  присоединены к аккумуляторной батарее  $B$  через коммутатор  $K$ , с помощью которого можно замыкать и размыкать электрическую цепь, образованную проводниками  $A$ ,  $C$  и  $B$ , а также изменять направление электрического тока в ней. Опыт показывает, что при замыкании цепи проводник  $C$  перемещается вдоль стержней  $A$  и  $B$ . Направление перемещения проводника  $C$  зависит от направления электрического тока в нем. На рис. 14.7 показаны оба возможных случая. Если ток  $I$  в проводнике  $C$  идет пер-

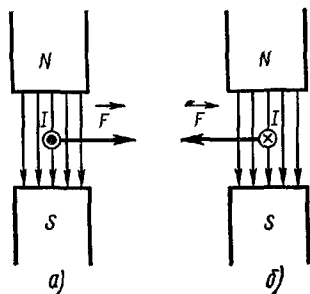


Рис. 14.7

пендикулярно плоскости чертежа «к нам» (такой ток принято обозначать кружком с точкой в его центре), то проводник перемещается вправо (рис. 14.7, а). Если ток  $I$  идет в противоположном направлении (такой ток принято обозначать кружком с крестом внутри его), то проводник  $C$  перемещается влево (рис. 14.7, б).

2. Действие магнитного поля на проводники с током было обнаружено Г. Эрстедом и А. Ампером. Ампер подробно исследовал это явление и пришел к выводу, что сила  $F$ , которая действует на прямолинейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле<sup>1</sup>, пропорциональна силе тока  $I$  в проводнике, его длине  $l$ , магнитной индукции  $B$  и синусу угла  $\alpha$  между направлением тока в проводнике и вектором  $\mathbf{B}$ :

$$F = \kappa I B l \sin \alpha \quad (14.1)$$

Закон Ампера (14.1) легко обобщить на случай неоднородного магнитного поля и проводника произвольной формы. В самом деле, бесконечно малый элемент  $dl$  проводника любой формы можно считать прямолинейным, а магнитное поле в области, занятой элементом  $dl$ , можно считать однородным.

Поэтому в общем случае закон Ампера имеет вид

$$dF = \kappa I B dl \sin(\widehat{dl, \mathbf{B}}), \quad (14.2)$$

где  $dF$  — сила, действующая на элемент проводника длиной  $dl$ , а угол  $\alpha$  заменен углом между векторами  $dl$  (проведенным в направлении тока  $I$ ) и  $\mathbf{B}$ . Коэффициент пропорциональности  $\kappa$  в формулах (14.1) и (14.2) зависит только от выбора единиц величин  $I$ ,  $B$ ,  $l$  и  $F$ . При выражении всех этих величин в единицах одной и той же системы единиц  $\kappa = 1$  (исключением является только система единиц Гаусса, см. § 15.3) Поэтому в дальнейшем коэффициент  $\kappa$  в законе Ампера мы будем опускать.

3. Закон Ампера позволяет определить числовое значение магнитной индукции  $B$ . Предположим, что элемент проводника  $dl$  с током  $I$  перпендикулярен направлению магнитного поля [ $\sin(\widehat{dl, \mathbf{B}}) = 1$ ], тогда закон Ампера можно записать в виде

$$B = \frac{1}{l} \frac{dF}{dl}. \quad (14.3)$$

Из формулы (14.3) следует, что магнитная индукция  $B$  численно равна силе, действующей со стороны поля на единицу длины проводника, по которому течет электрический ток единичной силы и который расположен перпендикулярно направлению магнитного поля. Таким образом, магнитная индукция является с л о в о й характеристикой магнитного поля, подобно тому, как напряженность  $E$  является силовой характеристикой электростатического поля.

<sup>1</sup> Магнитное поле называется однородным, если векторы индукции во всех точках этого поля одинаковы, т. е. численно равны и имеют одинаковые направления.

Единицы магнитной индукции в различных системах единиц рассмотрены в гл. XV.

4. Закон Ампера, записанный в форме (14.2), не указывает направления силы  $d\mathbf{F}$  и поэтому не определяет ее полностью. Как показали опыты (см., например, рис. 14.7), направление силы  $d\mathbf{F}$  можно найти по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили линии магнитной индукции, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению электрического тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник со стороны поля. Это правило очень удобно, когда элемент  $d\mathbf{l}$  проводника с током перпендикулярен направлению магнитного поля. Во всех остальных случаях оно нуждается в дополнительных пояснениях. Поэтому для отыскания направления силы  $d\mathbf{F}$  лучше пользоваться более универсальным правилом: вектор  $d\mathbf{F}$  направлен перпендикулярно плоскости, образованной векторами  $d\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$  таким образом, чтобы из конца вектора  $d\mathbf{F}$  вращение от вектора  $d\mathbf{l}$  к вектору  $\mathbf{B}$  по кратчайшему пути происходило против часовой стрелки. Иными словами, вектор  $d\mathbf{F}$  совпадает по направлению с векторным произведением  $[d\mathbf{l} \mathbf{B}]$ . Из математики известно, что модуль векторного произведения равен произведению модулей векторов на синус угла между ними:

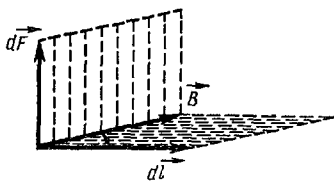


Рис. 14.8

$$|[d\mathbf{l} \mathbf{B}]| = dlB \sin(\widehat{d\mathbf{l}, \mathbf{B}}) \quad (14.4)$$

Поэтому можно записать закон Ампера в векторной форме следующим образом:

$$d\mathbf{F} = I [d\mathbf{l} \mathbf{B}] \quad (14.5)$$

Взаимное расположение векторов  $d\mathbf{F}$ ,  $d\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$  представлено на рис. 14.8. Если элемент проводника  $d\mathbf{l}$  перпендикулярен  $\mathbf{B}$ , то при заданном значении силы тока  $I$  сила  $d\mathbf{F}$  максимальна:  $d\mathbf{F} = d\mathbf{F}_{\text{макс}}$ . Таким образом, можно указать еще один способ нахождения направления вектора магнитной индукции. Вектор  $\mathbf{B}$  образует с векторами  $d\mathbf{F}_{\text{макс}}$  и  $d\mathbf{l}$  правую тройку, т.е. направлен перпендикулярно плоскости этих векторов таким образом, чтобы из его конца вращение от  $d\mathbf{F}_{\text{макс}}$  к  $d\mathbf{l}$  по кратчайшему пути было видно происходящим против часовой стрелки. Само собой разумеется, что этот способ определения направления вектора  $\mathbf{B}$  полностью согласуется со способом, приведенным в § 14.1 и основанным на использовании магнитной стрелки.

5. В заключение остановимся на существенной особенности сил электромагнитного взаимодействия, которая выражена в законе Ампера. В электростатике мы имели дело с **центральными силами**, так как сила взаимодействия между двумя точечными зарядами направлена по линии, соединяющей эти заряды. Примером центральных сил

являются также силы тяготения (гравитационные силы). Сила, действующая на точечный заряд  $q$ , помещенный в электростатическое поле с напряженностью  $E$ , совпадает по величине и направлению с вектором  $qE$ , т.е. направлена по касательной к силовой линии электростатического поля. Силы же электромагнитного взаимодействия, как видно из закона Ампера (14.5), не являются центральными. Они всегда направлены перпендикулярно линиям магнитной индукции и проводникам с токами, т.е. их абсолютные значения и направления существенным образом зависят от ориентации в магнитном поле рассматриваемых элементов проводников с токами.

### Вопросы для повторения

1. Опишите опыты Эрстеда, Иоффе и Эйхенвальда, позволившие обнаружить магнитное действие токов.

2. В чем состоит закон Ампера? Какова особенность сил электромагнитного взаимодействия?

3. Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля? Дайте ее определение.

4. Что называется линиями магнитной индукции? Как устанавливается их направление? Нарисуйте линии магнитной индукции для простейших магнитных полей.

5. В чем состоит гипотеза Ампера о природе магнетизма?