

Часть V

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Глава XIV

ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ЗАКОН АМПЕРА

§ 14.1. Магнитное поле

1. Занимаясь изучением электропроводности твердых, жидких и газообразных тел и основных законов постоянного тока, мы ограничивались рассмотрением процессов, происходящих в н у т р и проводников с токами. Однако этим не исчерпываются все явления, связанные с прохождением электрического тока. Опыты показали, что вокруг проводников с током и постоянных магнитов¹ существует **магнитное поле**, которое легко обнаружить по силовому действию, оказываемому им на другие проводники с током или постоянные магниты. Дальше мы увидим, что магнитное поле, подобно электрическому, обладает энергией и свойством инерции. Таким образом, оно столь же материально, как и рассмотренное нами выше электрическое поле.

2. Из курса физики средней школы известны элементарные сведения о магнетизме, а именно: все постоянные магниты обладают двумя разноименными полюсами — северным, или положительным, и южным, или отрицательным. Одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные — взаимно притягиваются. В связи с этим постоянные магниты оказывают ориентирующее действие на помещенную вблизи от них магнитную стрелку, если она может свободно вращаться вокруг своего центра тяжести. Исследования поведения таких магнитных стрелок в различных точках земного шара привели к выводу о существовании магнитного поля Земли. Магнитные полюсы Земли не совпадают с ее географическими полюсами, причем положение магнитных полюсов с течением времени медленно изменяется.

3. Для изучения основных свойств магнитного поля и способов его создания рассмотрим два опыта.

О п ы т I. Взаимодействие между неподвижными электрическими зарядами и постоянными магнитами.

Расположим вблизи магнитной стрелки компаса легкий шарик из диэлектрика (например, из сердцевины бузины), подвешенный на изолирующей нити. Сообщив ему заряд, мы не обнаружим никакого

¹ Постоянные магниты изготавливаются из ферромагнитных металлов и сплавов. О природе ферромагнетизма см. в гл. XX.

действия со стороны неподвижных электрических зарядов шарика на магнитную стрелку компаса¹. В свою очередь, магнитное поле стрелки не действует на заряженный шарик. Таким образом, приходим к выводу, что неподвижные электрические заряды не создают магнитного поля и что постоянное магнитное поле не действует на неподвижные заряды.

Опыт 2. Взаимодействие между постоянным электрическим током и магнитной стрелкой.

Под прямолинейным проводником, расположенным горизонтально, поместим магнитную стрелку, которая может свободно вращаться

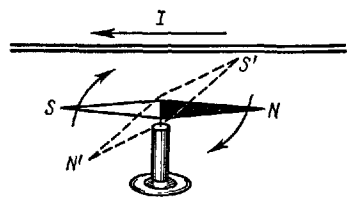


Рис. 14.1

вокруг вертикальной оси (рис. 14.1). При пропускании по проводнику постоянного тока I магнитная стрелка поворачивается вокруг своей оси, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику с током. Ось стрелки тем точнее совпадает с этим направлением, чем больше сила тока и слабее влияние магнитного поля Земли. Это явление было открыто в 1820 г. датским физиком Г. Эрстедом и послужило началом исследования электромагнитных явлений.

Эрстед обнаружил, что направление поворота северного полюса стрелки под действием тока изменяется на противоположное при изменении направления тока в проводнике.

В дальнейшем экспериментально исследовалось действие на магнитную стрелку электрического тока, протекающего по проводникам самой различной формы. Во всех случаях проводники с током оказывали ориентирующее действие на магнитную стрелку. Таким образом, можно сделать следующий вывод: при прохождении по проводнику тока вокруг проводника возникает магнитное поле, действующее на помещенную в это поле магнитную стрелку.

4. Ток в проводнике представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Поэтому на основании приведенных выше опытов естественно предположить, что вокруг всякого движущегося заряда должно существовать магнитное поле. При этом материал проводника и характер его проводимости (электронный или ионный), а также происходящие в нем процессы (например, нагревание, электролиз и т.д.) никакой роли не играют. Действительно, используя в опыте Эрстеда проводники одинаковой формы и размеров, изготовленные из разных металлов, а также из разных твердых и жидких электролитов, мы не обнаружим никаких различий в отклонении магнитной стрелки, если во всех случаях сила тока в проводниках будет одинаковой.

¹ Чтобы исключить притяжение заряженного шарика к металлическому корпусу компаса, обусловленное явлением электростатической индукции (см. § 4.2), шарик следует поместить в центре сферической оболочки, изготовленной из медной сетки.

5. Непосредственное измерение действия магнитного поля движущихся электронов на магнитную стрелку было произведено в 1911 г. А. Ф. Иоффе. Принципиальная схема его установки приведена на рис. 14.2. Внутри стеклянной трубки M был создан высокий вакуум. Электроны, вылетающие из катода K , который нагревался током от батареи накала B_n , ускорялись электрическим полем, созданным

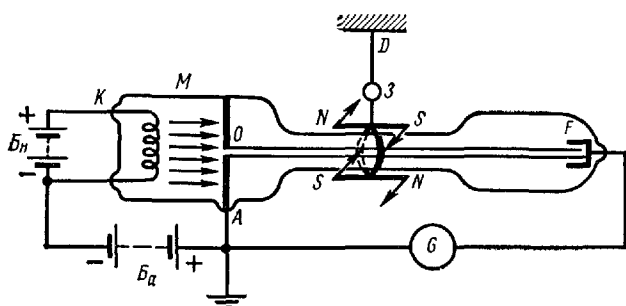


Рис. 14.2

между катодом K и анодом A батареей B_a . В центре O анода трубки имелось небольшое отверстие, через которое проходила часть электронов. Узкий пучок электронов в пространстве за анодом попадал в цилиндр Фарадея F , соединенный через гальванометр G с положительным полюсом батареи B_a . В средней части трубки по обе стороны электронного пучка располагались две одинаковые легкие магнитные стрелки $N - S$, антипараллельные друг другу. Стрелки были скреплены между собой легким кольцом, свободно охватывающим трубку. Вся эта система была подвешена на упругой нити. Применение двух параллельных и противоположно направленных магнитных стрелок (такая система называется *астатической*) позволило исключить влияние магнитного поля Земли, так как его действия на стрелки взаимно уничтожаются.

При движении в трубке пучка электронов возникает магнитное поле, действующее на каждую стрелку так, как показано на рис. 14.2. Угол закручивания нити D , регистрировавшийся по смещению светового зайчика, отраженного от зеркальца Z , позволял судить о силе, с которой магнитное поле электронного пучка действовало на магнитные стрелки. Сила тока в трубке измерялась гальванометром G . Заменяв катодную трубку M прямолинейным проводником, по которому шел ток такой же силы, как и в трубке, Иоффе установил, что угол закручивания нити не изменился. Таким образом, было доказано, что свободные электронные пучки по своему магнитному действию эквивалентны токам в проводниках.

6. Рядом исследований, в числе которых необходимо отметить опыты А. А. Эйхенвальда (1901 г.), было доказано, что магнитное действие конвекционных токов, образованных движением в простран-

стве заряженных тел и поляризованных диэлектриков, также подобно магнитному действию токов проводимости.

Упрощенная схема прибора Эйхенвальда приведена на рис. 14.3. Внутри металлического корпуса F находился диск A , который мог вращаться вокруг оси OO_1 . Диск был изготовлен из материала, обладающего высокими диэлектрическими свойствами. На этот диск по внешней его окружности наклеивался станиоловый ободок B , представлявший собой незамкнутое кольцо. Корпус прибора F и станиоловый ободок B играли роль двух обкладок конденсатора, емкость C которого была предварительно измерена. Конденсатор заряжался от электростатической машины до разности потенциалов $\Delta\phi$ между обкладками. При этом заряд обкладки B равен $q = C\Delta\phi$.

Диск A приводился в быстрое вращение вокруг оси OO_1 . Сила возникающего при этом конвекционного тока

$$I_{\kappa} = qn = C\Delta\phi n,$$

где n — число оборотов диска за единицу времени. О магнитном поле конвекционного тока можно было судить по его действию на легкую магнитную стрелку M , подвешенную на упругой нити L внутри защитного металлического кожуха E со стеклянным окошечком N . Угол поворота стрелки определялся по смещению от-

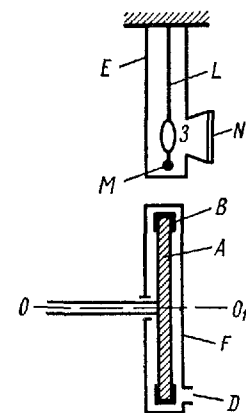


Рис. 14.3

раженного от зеркала Z светового луча, падающего на шкалу, не изображенную на рисунке.

Затем диск A устанавливался неподвижно, и через отверстие D в корпусе прибора к концам станиолового ободка B подводился ток от внешнего источника. Ток проводимости I в ободке подбирался таким, чтобы отклонение магнитной стрелки было равно ее отклонению при конвекционном токе I_{κ} . Опыты показали, что $I = I_{\kappa}$. Этим было доказано, что конвекционные токи по своему магнитному действию подобны токам проводимости.

7. Рассмотренные опыты показывают, что вокруг всякого движущегося заряда, будь то электрон, ион или заряженное тело, помимо электрического поля существует также и магнитное поле. Электрическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся в нем заряды. Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует только на движущиеся в этом поле электрические заряды. Следовательно, между двумя движущимися друг относительно друга зарядами существуют электрическое и магнитное взаимодействия. Подробнее мы остановимся на этом вопросе в § 18.1.

8. Основной характеристикой магнитного поля служит **вектор магнитной индукции \mathbf{B}** . Не останавливаясь сейчас на выяснении физического смысла вектора магнитной индукции и точном его определении, укажем лишь на один из способов установления направления вектора

В в различных точках магнитного поля¹. Условились считать, что вектор магнитной индукции **В** в произвольной точке поля совпадает по направлению с силой, которая действует на северный полюс бесконечно малой магнитной стрелки, помещенной в эту точку поля. Такая магнитная стрелка не может своим присутствием исказить то поле, в кото-

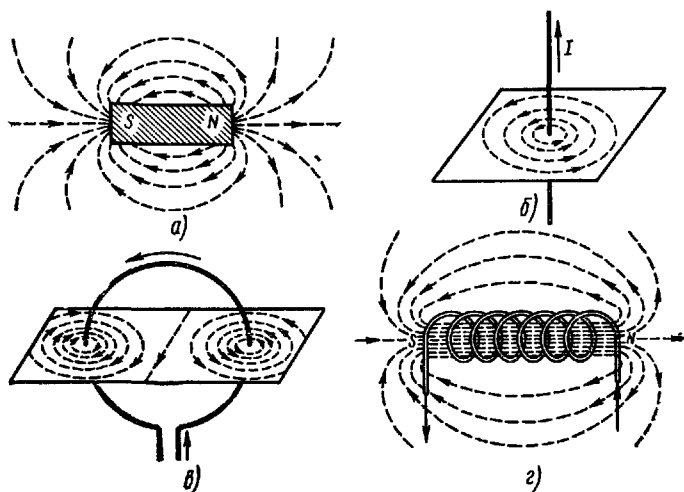


Рис 14.4

рое она вносится. Сила, действующая со стороны магнитного поля на южный полюс стрелки, направлена в сторону, противоположную вектору **В**. Оба полюса такой магнитной стрелки лежат в бесконечно близких точках поля, так что силы, действующие на оба полюса, численно равны друг другу. Следовательно, в магнитном поле на магнитную стрелку действует пара сил, поворачивающая ее таким образом, чтобы ось стрелки, соединяющая южный полюс с северным, совпала с направлением поля, т. е. вектора **В**.

9. Для графического изображения магнитных полей удобно пользоваться линиями магнитной индукции. **Линиями магнитной индукции** называют линии, проведенные в магнитном поле так, что вектор **В** в каждой точке этой линии направлен по касательной к ней.

Линии магнитной индукции проще всего наблюдать с помощью мелких игольчатых железных опилок, которые намагничиваются в исследуемом поле и ведут себя подобно маленьким магнитным стрелкам. Картины плоских сечений простейших магнитных полей (рис. 14.4) известны из курса физики средней школы.

Из рис. 14.4, б, в, г видно, что линии магнитной индукции охватывают проводники с током. Вблизи проводника линии магнитной индукции лежат в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Направ-

¹ Другой способ, основанный на ориентирующем действии магнитного поля на рамку с током, рассмотрен в § 17 1.

ление линий индукции магнитного поля тока определяется по известному **правилу буравчика**: если ввинчивать буравчик по направлению вектора плотности тока в проводнике, то направление движения рукоятки буравчика укажет направление линий магнитной индукции.

Линии индукции магнитного поля тока ни в каких точках поля не могут обрываться, т. е. ни начинаться, ни кончаться. Эти линии либо замкнуты (рис. 14.4, б, в, г), либо идут из бесконечности в бесконечность (рис. 14.4, в, г), либо, наконец, бесконечно навиваются на некоторую поверхность, всюду плотно заполняя ее, но никогда не возвращаясь вторично в любую точку поверхности. Можно доказать, что этот последний случай реализуется, например, в поле, создаваемом системой из кругового тока I_1 и бесконечного прямого тока I_2 , проходящего через центр кругового тока перпендикулярно его плоскости (рис. 14.5)

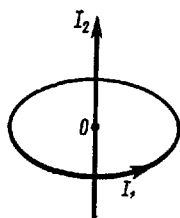


Рис. 14.5

Для сравнения магнитного поля с электростатическим полезно напомнить, что силовые линии электростатического поля **р а з о м к н у т ы**. Они начинаются на положительных зарядах, оканчиваются на отрицательных и вблизи от заряженного проводника направлены перпендикулярно его поверхности.

10. Из сопоставления рис. 14.4, а и 14.4, г видно, что магнитное поле вне соленоида, т. е. длинной катушки с током, подобно магнитному полю полосового магнита. Северный полюс магнита (см. рис. 14.4, а) соответствует тому концу соленоида, из которого ток в витках виден идущим против часовой стрелки (см. рис. 14.4, г). Магнитное поле кругового тока (см. рис. 14.4, в), представляющего собой один виток соленоида, подобно полю очень короткого полосового магнита, расположенного в центре витка так, что его ось перпендикулярна плоскости витка. Такой полосовой магнитик естественно назвать **магнитным диполем**.

Из рис. 14.4, а видно, что линии магнитной индукции постоянного магнита выходят из его северного полюса и входят в южный. На первый взгляд кажется, что здесь имеется полная аналогия с силовыми линиями электростатического поля, причем полюсы магнита играют роль магнитных «зарядов» (магнитных масс), создающих магнитное поле. Однако опыты показали, что, разрезая постоянный магнит на части, нельзя разделить его полюсы, т. е. нельзя получить магнит либо с одним северным, либо с одним южным полюсом. Каждая сколь угодно малая часть постоянного магнита всегда имеет оба полюса. Следовательно, в отличие от электрических зарядов свободных магнитных «зарядов» в природе не существует. Нет их и в полюсах постоянных магнитов. Поэтому линии магнитной индукции не могут обрываться на полюсах.

Полная аналогия между магнитными полями полосовых магнитов и соленоидов позволила выдающемуся французскому физика А. Амперу (1821—1822) высказать гипотезу о том, что магнитные свойства

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-

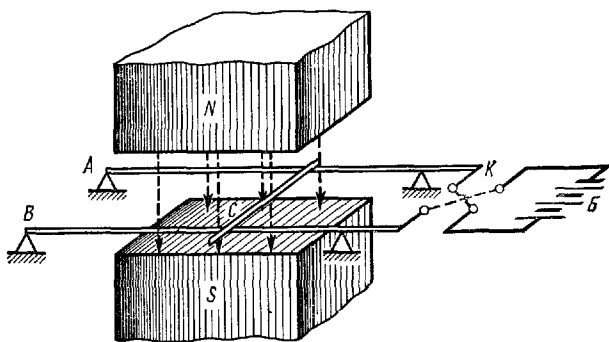


Рис 14.6

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-

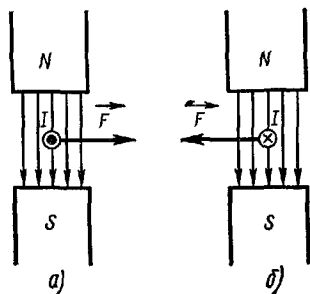


Рис. 14.7