

ГЛАВА 5

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



Как вы уже знаете, между заряженными телами (частицами), кроме гравитационного, существует и электромагнитное взаимодействие. Если заряды покоятся относительно определённой инерциальной системы отсчёта, электромагнитное взаимодействие между ними называют *электростатическим*. При движении электрически заряженных тел (частиц) проявляется составляющая электромагнитного взаимодействия — *магнитное взаимодействие*.

В этой главе вы познакомитесь с явлениями, в которых важную роль играет магнитное взаимодействие, обусловленное существованием магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, электрическим током или изменяющимся во времени электрическим полем.

§ 27. Действие магнитного поля на проводник с током. Взаимодействие проводников с током

Явления взаимодействия одноимённых и разноимённых электрических зарядов напоминают явления отталкивания одноимённых полюсов и притяжения разноимённых полюсов магнитов (рис. 136). Электрические взаимодействия осуществляются посредством электрических полей, а чем обусловлены магнитные взаимодействия и чем определяют магнитные свойства тел?

Магнитное поле. То, что магниты взаимодействуют друг с другом, что распиленный пополам магнит превращается в два магнита, а железо при соприкосновении с магнитом намагничивается, было установлено достаточно давно. Гораздо позже обнаружили связь между электрическими и магнитными явлениями, хотя намагничивание железных предметов, перемагничивание стрелки компаса во время



Рис. 136

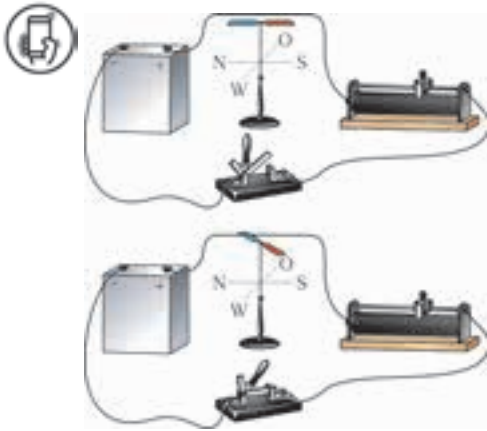


Рис. 137

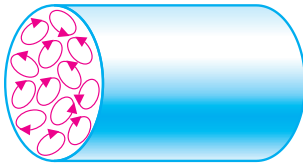


Рис. 138

грозовых электрических разрядов и многие другие наблюдения и опыты заставляли учёных задуматься над этим. Первыми эту связь исследовали в 1820 г. датский физик Ханс Христиан Эрстед (1777–1851) и уже известный вам французский физик и математик Андре-Мари Ампер.

Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная вблизи проводника, поворачивалась на некоторый угол при прохождении по проводнику электрического тока (рис. 137). Открытие Эрстеда позволило Амперу сделать вывод, что магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами, циркулирующими внутри этого тела и получившими название «амперовы токи» или «молекулярные токи» (рис. 138). Это означало, что магнитное взаимодействие обусловлено не особыми магнитными зарядами, а движением электрических зарядов — электрическим током.

Взаимодействие проводника с током и магнитной стрелки в опыте Эрстеда является взаимодействием электрического тока проводника с «амперовыми токами» в магнитной стрелке (гипотеза Ампера). Это взаимодействие осуществляется посредством *магнитного поля*.

Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая движущимися относительно определённой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами или переменными электрическими полями.



Опыты свидетельствуют, что магнитное поле возникает при движении любых электрических зарядов.

Посредством магнитного поля осуществляется взаимодействие между подвижными электрическими зарядами (а также магнитами). При этом каждый движущийся в данной инерциальной системе отсчёта электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле. Это поле действует некоторыми силами на любые другие движущиеся электрические заряды, а также находящиеся в нём магниты.

Таким образом, о существовании магнитного поля можно судить по наличию силы, действующей на электрический заряд, движущийся относительно выбранной инерциальной системы отсчёта, или находящийся в этом поле магнит.

От теории к практике

Магнитная стрелка, расположенная под медным проводником, поворачивается на некоторый угол при прохождении по нему электрического тока. Будет ли стрелка поворачиваться, если медный проводник заменить водным раствором щёлочи, помещённым в тонкую стеклянную трубку?

Интересно знать

Современные научные представления не отвергают, а наоборот, предсказывают частицы с магнитным зарядом — магнитные монополи. Однако такие частицы пока экспериментально не наблюдали.

Действие магнитного поля на проводник с током. Поскольку магнитное поле проводника с током действует определённой силой на магнит (в опыте Эрстеда — на магнитную стрелку), то естественно предположить, что со стороны магнитного поля магнита на проводник с током должна действовать сила. Это предположение можно проверить экспериментально.

Соберём электрическую цепь, представленную на рисунке 139, *а*. При разомкнутой цепи действия со стороны магнитного поля подковообразного магнита на гибкий проводник не наблюдается. При замыкании цепи проводник приходит в движение: он либо втягивается в пространство между полюсами подковообразного магнита (рис. 139, *б*), либо выталкивается из него (рис. 139, *в*) при противоположном расположении полюсов магнита (или при изменении направления тока). Этот опыт наглядно доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

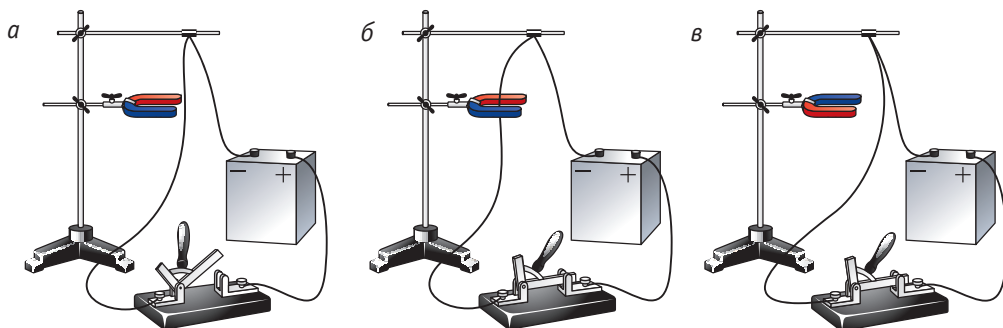


Рис. 139



Во всех рассмотренных случаях на проводники с током (движущиеся заряженные частицы) действовали *магнитные силы*, которые можно рассматривать как результат взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитными полями проводников с током (движущихся заряженных частиц).

Магнитные силы — силы, действующие со стороны магнитного поля на находящиеся в нём магниты, проводники с током или движущиеся заряды.

Взаимодействие проводников с током. Открытие Эрстеда активизировало исследования по установлению связи между электрическими и магнитными явлениями. Ампер в 1820 г. провёл ряд экспериментов по изучению взаимодействия двух гибких первоначально расположенных прямолинейно и параллельно проводников с током. Он установил, что когда ток в проводниках проходит в противоположных направлениях, они отталкиваются (рис. 140, а), а когда в одинаковых направлениях — притягиваются (рис. 140, б). При отсутствии тока в проводниках они не проявляют магнитного взаимодействия (рис. 140, в).

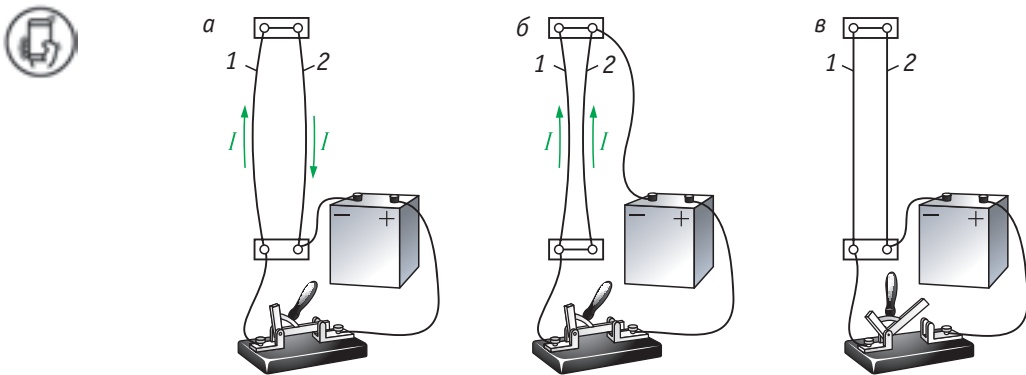


Рис. 140

Магнитное поле одного проводника с током взаимодействует с током другого проводника посредством магнитной силы.

Магнитное взаимодействие двух параллельных проводников с током используют в СИ для определения единицы силы тока — ампера.

1 ампер — это сила неизменяющегося тока, который при прохождении по каждому из двух параллельных прямолинейных проводников бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, модуль которой равен $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.



Действие магнитного поля на рамку с током. Действие магнитного поля на проводник с током проявляется не только в притяжении или отталкивании. Проведём опыт. Подвесим около длинного тонкого вертикально расположенного проводника на тонких и гибких подводящих проводах маленькую (по сравнению с расстоянием, на котором магнитное поле заметно изменяется, т. е. подальше от проводника) рамку (рис. 141, а). При пропускании по проводнику и рамке электрического тока рамка поворачивается и располагается так, что оказывается в одной плоскости с проводником с током (рис. 141, б). Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*, аналогичное действию на стрелку компаса.

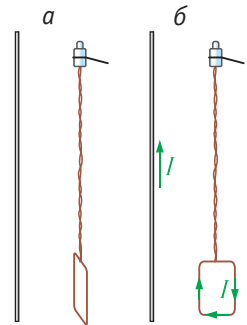


Рис. 141

Проведём ещё один опыт. Поместим проволочную рамку между полюсами постоянного подковообразного магнита. Если по рамке проходит ток, она устанавливается так, что её плоскость становится перпендикулярной прямой, соединяющей полюса магнита (рис. 142). В данном случае магнитное поле подковообразного магнита также оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*.

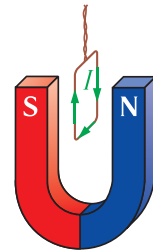


Рис. 142



Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая движущимися относительно определённой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами или переменными электрическими полями

Каждый движущийся электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует определёнными силами на любые другие движущиеся электрические заряды

Магнитные силы — силы, действующие со стороны магнитного поля на находящиеся в нём магниты, проводники с током или движущиеся заряды

Магнитное поле оказывает ориентирующее действие на рамку с током и на магнитную стрелку



1. Какие поля существуют в пространстве, окружающем движущийся электрический заряд?
2. Что представляет собой магнитное поле? Как его можно обнаружить?
3. Какой опыт доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды?
4. Что называют магнитной силой?
5. Какое явление используют для определения единицы силы тока в СИ?
6. В чём проявляется действие магнитного поля на рамку с током?
7. В книге французского естествоиспытателя Араго «Гром и молния» приведены примеры перемагничивания стрелки компаса и намагничивания стальных предметов действием молнии. Как можно объяснить эти явления?

§ 28. Индукция магнитного поля.

Линии индукции магнитного поля

Для описания электростатического поля используют его основную характеристику — напряжённость \vec{E} . Существует ли аналогичная характеристика для описания магнитного поля?



Рис. 143

Направление индукции магнитного поля. Основной характеристикой, используемой для описания магнитного поля, является физическая векторная величина — *индукция магнитного поля* \vec{B} . Зная индукцию магнитного поля, можно определить силу, действующую на проводник с током (движущийся заряд) в магнитном поле.

Для определения направления индукции магнитного поля \vec{B} используют ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током.

За направление индукции магнитного поля в данной точке поля принимают направление от южного полюса S к северному полюсу N свободно устанавливающейся магнитной стрелки, расположенной в рассматриваемой точке (рис. 143).

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитные стрелки располагаются по касательным к окружностям (рис. 144), центры которых лежат на оси проводника.

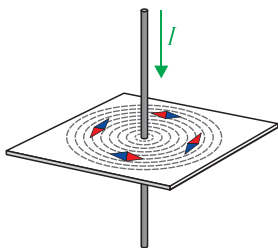


Рис. 144



На практике часто приходится иметь дело с магнитными полями электрических токов, проходящих по катушкам (соленоидам). В магнитном поле катушки с током магнитные стрелки устанавливаются по касательным к замкнутому кривым, охватывающим витки катушки (рис. 145).

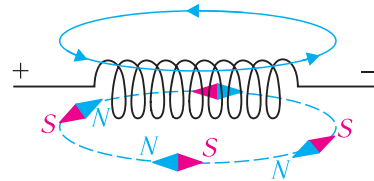


Рис. 145

Линии индукции магнитного поля. Распределение электростатического поля в пространстве можно сделать «видимым», используя представление о линиях напряжённости. Исследуя магнитное поле, создаваемое проводником с током или постоянным магнитом, с помощью магнитной стрелки в каждой точке пространства можно определить направление индукции магнитного поля. Такое исследование позволяет графически представить магнитное поле в виде *линий магнитной индукции*.

Линии индукции магнитного поля — воображаемые линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением индукции магнитного поля (рис. 146).



Рис. 146

Линии индукции магнитного поля непрерывны (не имеют ни начала, ни конца), замыкаются сами на себя. Это характерно для любых магнитных полей. Поля, обладающие таким свойством, называют *вихревыми*.

Очевидно, что через любую точку в магнитном поле можно провести только одну линию индукции. Поскольку индукция магнитного поля в любой точке пространства имеет определённое направление, то и направление линии индукции в каждой точке этого поля может быть только единственным. Это означает, что линии магнитной индукции, так же как и линии напряжённости электрического поля, не пересекаются.

Направление линий индукции магнитного поля. Определить направление линий индукции магнитного поля можно, используя **правило буравчика**: если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока, то рукоятка буравчика поворачивается в направлении линий индукции магнитного поля. В случае прямолинейного проводника с током линии индукции магнитного поля представляют собой концентрические окружности, которые находятся в плоскостях, перпендикулярных к проводнику (рис. 147).

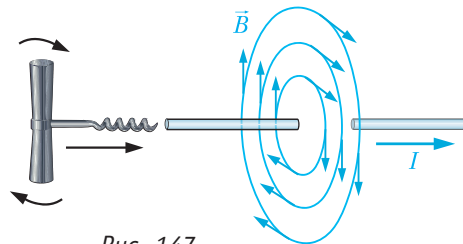


Рис. 147



Определить направление линий индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током можно также с помощью *правила правой руки*: если мысленно обхватить проводник правой рукой так, чтобы большой палец указывал направление тока, то остальные пальцы окажутся согнуты в направлении линий индукции магнитного поля (рис. 148).

Картину линий индукции магнитного поля можно получить, используя мелкие железные опилки, которые в магнитном поле ведут себя как магнитные стрелки. На рисунке 149 представлена картина магнитного поля прямолинейного участка проводника с током. Картина магнитного поля кругового витка с током и графическое изображение линий индукции представлены на рисунках 150, а, б.

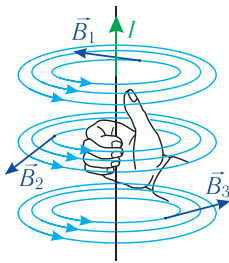


Рис. 148



Рис. 149

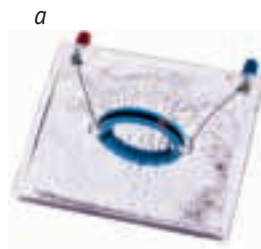
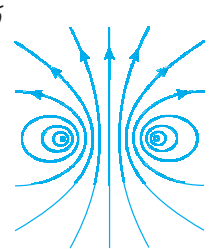


Рис. 150



Полагают, что линии индукции магнитного поля, созданного постоянным магнитом, направлены внутри магнита от его южного полюса S к северному N (рис. 151).

Магнитное поле соленоида подобно полю полосового магнита. На рисунках 152, а, б представлена картина магнитного поля соленоида с током и дано графическое изображение линий индукции. Соленоид представляет собой цилиндрическую катушку, на которую виток к витку намотан провод, изолированный тонким слоем лака. Если длина соленоида много больше его диаметра, то внутри центральной части соленоида линии индукции магнитного поля практически параллельны и направлены вдоль его оси.

Однородное магнитное поле — поле, индукция которого во всех точках пространства одинакова.

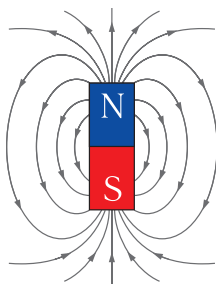


Рис. 151

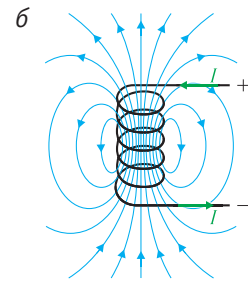
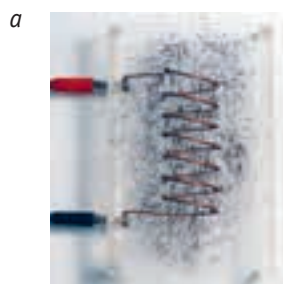


Рис. 152

Линии индукции такого поля параллельны. В противном случае поле называют неоднородным. Магнитное поле внутри длинного соленоида практически однородно, а вблизи краёв — неоднородно. Неоднородно и магнитное поле прямолинейного проводника с током (см. рис. 148).

Для наглядности на рисунках линии индукции изображают гуще в тех местах магнитного поля, где больше значение индукции магнитного поля (рис. 152, б). При этом на линии индукции указывают стрелкой направление индукции магнитного поля.

Для крайних витков соленоида магнитное поле «кругового» витка с током, проходящим в направлении движения часовой стрелки, эквивалентно полю южного полюса постоянного магнита, а магнитное поле «кругового» витка с током, проходящим против направления движения часовой стрелки, эквивалентно полю северного полюса постоянного магнита (правило часовой стрелки) (рис. 153).

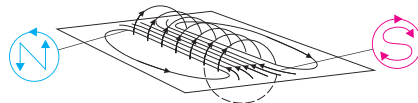


Рис. 153

От теории к практике

На рисунке 154 схематически изображено магнитное поле кругового витка с током. Однородно ли такое магнитное поле? Почему?

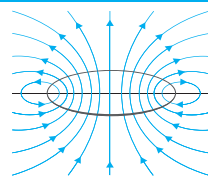


Рис. 154

Определение направления индукции магнитного поля. Для определения направления индукции магнитного поля можно воспользоваться любым из правил, сформулированных выше. Причём, пользуясь правилом буравчика, надо помнить, что направление тока — это направление упорядоченного движения положительных зарядов. Если на рисунке изображён прямолинейный проводник с током, расположенный перпендикулярно плоскости страницы (рис. 155), и при этом ток направлен от читателя, то его условно обозначают крестиком (рис. 156, а); в случае, если ток направлен к читателю, — точкой (рис. 156, б). Так же (точкой или крестиком) обозначают направления векторов (индукции магнитного поля, силы и др.), расположенных перпендикулярно плоскости рисунка.

Полюсы соленоида, а следовательно, и направление индукции магнитного поля можно определить по правилу часовой стрелки (см. рис. 153) или правилу буравчика: если направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением тока в витке,

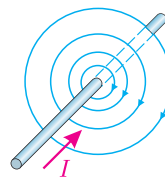


Рис. 155

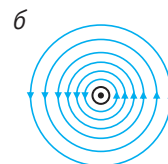
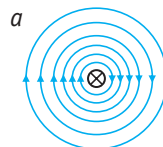


Рис. 156

то поступательное движение острия буравчика укажет направление индукции магнитного поля внутри соленоида, а следовательно, и положение его северного полюса.



Линии индукции магнитного поля — воображаемые линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением индукции магнитного поля



Линии индукции магнитного поля

непрерывны (не имеют ни начала, ни конца), замыкаются сами на себя

не пересекаются, так как в любой точке пространства индукция магнитного поля имеет определённое направление

направление индукции магнитного поля определяют по:
 — правилу буравчика,
 — правилу правой руки,
 — правилу часовой стрелки

Магнитное поле, индукция которого во всех точках пространства одинакова, называют однородным магнитным полем



1. Какие правила используют для определения направления индукции магнитного поля?
2. Как графически изображают магнитное поле? Что называют линиями индукции магнитного поля?
3. Какова картина линий индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током? кругового витка с током? катушки с током? Как определяют направление линий индукции магнитного поля?
4. Какие поля называют вихревыми?
5. В чём отличие магнитного поля от электростатического?
6. Какое магнитное поле называют однородным?

Примеры решения задач

Пример 1. Электроны, образующие «электронный луч», движутся так, как изображено на рисунке 157, а. Определите направление линий индукции магнитного поля, создаваемого этими электронами.

Решение. Определить направление линий индукции магнитного поля, создаваемого движущимися электронами, можно как по правилу буравчика, так и по правилу правой руки. Однако следует помнить, что эти правила сформулированы для движущихся положительных зарядов. Поэтому в данном случае надо

учесть, что за направление электрического тока принято направление, противоположное движению электронов. Тогда, если смотреть на линию индукции по направлению движения электронов, она будет сориентирована против направления движения часовой стрелки (рис. 157, б).

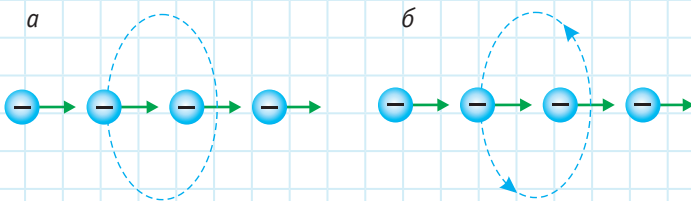


Рис. 157

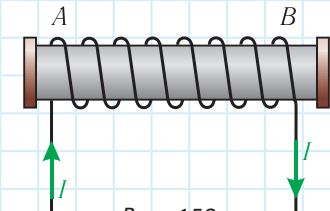


Рис. 158

Пример 2. На рисунке 158 указано направление электрического тока в соленоиде. Определите магнитные полюсы соленоида.

Решение. Для определения магнитных полюсов соленоида можно воспользоваться как правилом буравчика, так и правилом часовой стрелки. В первом случае будем мысленно вращать буравчик по направлению тока в витках соленоида. Остриё буравчика при этом перемещается вдоль оси соленоида от торца A к торцу B . Так как линии индукции внутри магнита направлены от южного полюса к его северному полюсу, то по аналогии можно сделать вывод, что у торца A — южный полюс соленоида, а у торца B — северный.

Проверим свой вывод, применив правило часовой стрелки. Если смотреть со стороны торца A соленоида, то видно, что направление тока в витке совпадает с направлением движения часовой стрелки. Следовательно, у торца A — южный полюс, а у торца B — северный.

Упражнение 20

1. Как направлены линии индукции магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником с током, изображённые на рисунке 159, a . В каком направлении проходит электрический ток в проводнике, изображённом на рисунке 159, $б$?

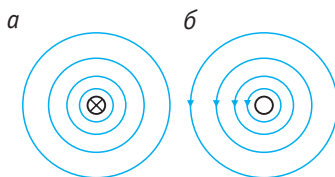


Рис. 159

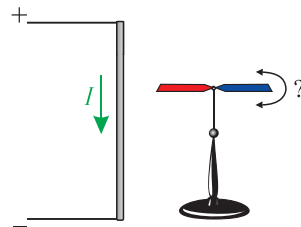


Рис. 160

3. По круговому витку проходит электрический ток (рис. 161). Как расположится магнитная стрелка, если её поместить в центр витка? Действие магнитного поля Земли не учитывать.

4. Как будут взаимодействовать две катушки, подвешенные на тонких проводах, если их подключить к источникам тока так, как изображено на рисунке 162?

5. При подключении соленоида к полюсам источника тока он отталкивается от расположенного вблизи постоянного магнита (рис. 163). В каком направлении идёт ток в соленоиде?

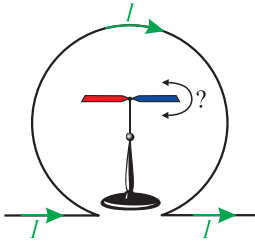


Рис. 161

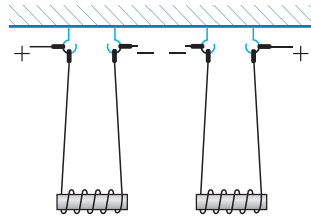


Рис. 162

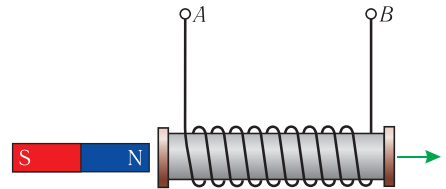


Рис. 163

§ 29. Сила Ампера.

Принцип суперпозиции магнитных полей

Для количественного описания магнитного поля необходимо знать не только направление индукции магнитного поля, но и её модуль. Характеристики электростатического поля определяют с помощью пробного заряда. Для определения характеристик магнитного поля используют «пробный» ток, который представляет собой малый участок проводника (элемент тока).

Модуль индукции магнитного поля. Действие магнитного поля на находящийся в нём малый участок проводника с током экспериментально исследовал Ампер, осуществив опыты с различными проводниками, входящими в замкнутые электрические цепи. В 1820 г. Ампер установил, что модуль силы, которой однородное магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током, зависит от величин, характеризующих этот проводник. Этими величинами являются сила тока I , проходящего по проводнику, и длина l прямолинейного участка проводника. Кроме того, оказалось, что модуль магнитной силы зависит от угла между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля \vec{B} . Причём при определённых силе тока и длине проводника модуль

