



## 3.3. Магнитное поле

### 3.3.1. Взаимодействие магнитов

**Магнитное поле** — одна из форм материи (отличная от вещества), существующая в пространстве, которое окружает постоянные магниты, проводники с током и движущиеся заряды.

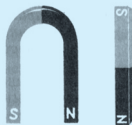


► **Постоянные магниты бывают:**

- природными;
- искусственными.

Магнитное поле вместе с электрическим полем образует единое **электромагнитное поле**.

Постоянный магнит — это изделие из материала, являющееся автономным (самостоятельным, изолированным) источником постоянного магнитного поля.



*N* — северный полюс;  
*S* — южный полюс  
*Рис. 3.15*



Полюс магнита — это место наибольшего сгущения магнитных силовых линий (их называют также линиями магнитного поля, или линиями магнитной индукции поля) (рис. 3.15).

Одноименные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

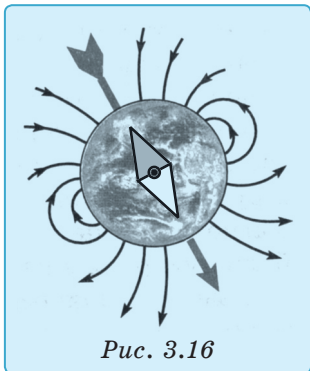


Рис. 3.16

Земной шар является магнитным диполем (рис. 3.16). Северный полюс магнитной стрелки указывает на южный магнитный полюс Земли. Этот полюс находится на севере земного шара, несколько в стороне от северного географического полюса. Северный магнитный полюс Земли находится вблизи южного географического полюса.

### 3.3.2. Магнитное поле проводника с током

Вокруг проводника с током тоже возникает магнитное поле.

Магнитное поле не только создается постоянными магнитами, движущимися зарядами и токами в проводниках, но и действует на них же.

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между движущимися электрическими зарядами, называют *магнитными*, а силы, с которыми проводники



с током действуют друг на друга, — магнитными силами.

*Магнитная индукция* — это векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление от южного полюса  $S$  к северному полюсу  $N$  магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 3.17).

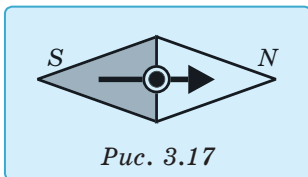


Рис. 3.17

Индукция магнитного поля в данной точке

равна отношению максимальной силы, действующей на проводник с током, к длине проводника и силе тока в проводнике, помещенном в эту точку:

$$B = \frac{F}{I\Delta l}; [B] = 1 \text{ Н/А}\cdot\text{м} = 1 \text{ Тл},$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $F$  — сила, действующая на проводник с током в магнитном поле;  $I$  — сила тока в проводнике;  $\Delta l$  — длина проводника.

Линиями магнитной индукции (или магнитными силовыми линиями, или просто магнитными линиями) называют линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке поля.

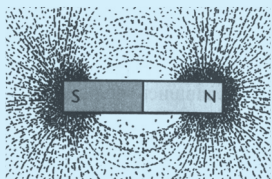
Магнитные линии — замкнутые линии, они выходят из северного полюса магнита и входят в южный.

Поля, силовые линии которых замкнуты, называются **вихревыми**.



Поэтому магнитное поле — это вихревое поле (в этом его отличие от электрического).

Направление магнитного поля прямого тока можно определить по правилу буравчика (рис. 3.18) и правилу правой руки.

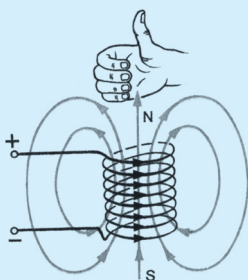


#### Правило буравчика

Если вращать рукоятку буравчика так, чтобы поступательное движение острия буравчика указывало направление тока, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление силовых линий магнитного поля тока.

Рис. 3.18

*Соленоид* — это проволочная спираль с током. Соленоид эквивалентен постоянным природным магнитам (рис 3.19). Направление линий его магнитного поля определяют с помощью правила правой руки.



#### Правило правой руки

Если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по току в витках, то отставленный большой палец укажет направление магнитных линий внутри соленоида.

Рис. 3.19



► **Вещества по магнитным свойствам:**

1. Диамагнетики ( $\mu < 1$ ).
2. Парамагнетики ( $\mu > 1$ ).
3. Ферромагнетики ( $\mu \gg 1$ ).

Магнитное действие соленоида увеличивается с увеличением силы тока и числа витков в соленоиде и при введении в него железного стержня, который называют сердечником. Соленоид с железным сердечником внутри называется электромагнитом.

Реакция среды на воздействие внешнего магнитного поля с индукцией  $B_0$  (поле в вакууме) определяется магнитной восприимчивостью:

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $B$  — индукция магнитного поля в веществе;  $B_0$  — индукция магнитного поля в вакууме.

**Температура Кюри ( $T_c$ )** — это температура, выше которой ферромагнитные материалы теряют свои магнитные свойства.

### 3.3.3. Сила Ампера

На прямолинейный участок проводника, по которому течет ток, который находится в магнитном поле, действует сила Ампера:

$$F = B|I|\Delta l \sin \alpha,$$

где  $F$  — сила Ампера;  $B$  — индукция магнитного поля;  $\Delta l$  — длина проводника;  $\alpha$  — угол между вектором магнитной индукции и направлением тока.





Направление силы Ампера определяется с помощью *правила левой руки* (рис. 3.20).

#### Правило левой руки

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в нее перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы Ампера.

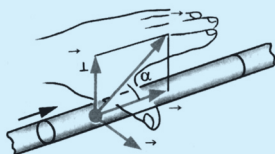


Рис. 3.20

Следствием действия силы Ампера является вращение рамки с током в постоянном магнитном поле.

#### 3.3.4. Сила Лоренца

**Сила Лоренца** — это сила, действующая на движущийся точечный электрический заряд во внешнем магнитном поле:

$$F = |q|vB \sin \alpha,$$

где  $q$  — заряд частицы;

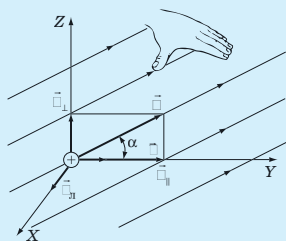
$B$  — магнитная индукция;

$v$  — скорость движения частицы;

$\alpha$  — угол между векторами скорости и индукции магнитного поля.

Направление силы Лоренца можно определить с помощью *правила левой руки* (рис. 3.21).





**Правило левой руки**  
Если расположить ладонь левой руки так, чтобы четыре вытянутых пальца указывали направление движения заряда, а вектор магнитной индукции поля входил в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд.

Рис. 3.21

Если заряд частицы отрицательный, то сила Лоренца будет направлена в противоположную сторону.

Если заряженная частица влетает со скоростью  $v$  в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям напряженности, то она будет равномерно вращаться по окружности радиусом  $r$ :

$$r = \frac{mv}{|q|B},$$

где  $m$  — масса частицы;  $v$  — скорость частицы;  $r$  — радиус кривизны траектории;  $B$  — магнитная индукция.

## 3.4. Электромагнитная индукция

### 3.4.1. Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что при





любом изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

▶ **Явление электромагнитной индукции можно обнаружить при:**

- ▶ относительном движении катушки и магнита;
- ▶ изменении индукции магнитного поля в контуре, расположенном перпендикулярно линиям магнитного поля;
- ▶ изменении положения контура, расположенного в постоянном магнитном поле.

### 3.4.2. Магнитный поток

**Магнитный поток** — это поток вектора магнитной индукции через какую-либо поверхность:

$$\Phi = BS \cos \alpha; [\Phi] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб},$$

где  $\Phi$  — магнитный поток;  $B$  — модуль вектора индукции магнитного поля;  $S$  — площадь контура;  $\alpha$  — угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции.



### 3.4.3. Закон электромагнитной индукции Фарадея

Как известно, электрические токи создают вокруг себя магнитное поле. Связь магнитного поля с током привела к многочисленным попыткам возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля. Эта задача была решена английским физиком М. Фарадеем, открывшим явление электромагнитной индукции.







Любое изменение магнитного поля вызывает появление вихревого электрического поля. В массивном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле, вихревое электрическое поле вызывает индукционные токи, или токи Фуко. Вследствие этого проводник нагревается, что в свою очередь приводит к увеличению потерь энергии. Поэтому сердечники и другие магнитопроводы изготавливают в виде пластин, разделенных тонкими изолирующими пленками, и ориентируют поверхности этих пластин перпендикулярно вектору напряженности вихревого электрического поля (т. е. чтобы они пересекали возможные линии вихревых токов).

ЭДС индукции, возникающая на концах проводника, движущегося с постоянной скоростью в постоянном магнитном поле:

$$\varepsilon_i = vBl\sin\alpha,$$

где  $v$  — скорость движения проводника;  $l$  — длина проводника;  $B$  — магнитная индукция;  $\alpha$  — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции.

### Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

или

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где  $\varepsilon_i$  — ЭДС индукции;

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  — скорость изменения магнитного потока.



Если проводник входит в состав замкнутой цепи, остальные части которой неподвижны, то в цепи возникает электрический ток.

Сила тока:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R + r} = \frac{vBl \sin \alpha}{R + r},$$

где  $R$  — сопротивление нагрузки;

$r$  — сопротивление проводника.

### 3.4.4. Правило Ленца

#### ▶ **Правило Ленца (закон Ленца):**

Направление индукционного тока всегда таково, что испытываемые им со стороны магнитного поля силы противодействуют движению контура, а создаваемый этим током магнитный поток стремится компенсировать изменения внешнего магнитного потока.

Если постоянный магнит вдвигать в катушку, замкнутую на гальванометр, индукционный ток в катушке будет иметь такое направление, которое создаст магнитное поле с вектором магнитной индукции, направленным противоположно вектору индукции поля магнита, т. е. будет выталкивать магнит из катушки или препятствовать его движению. При вытягивании магнита из катушки, наоборот, поле, создаваемое индукционным током, будет притягивать катушку, т. е. опять препятствовать его движению.

#### ▶ **Для определения направления индукционного тока необходимо:**

1. Установить направление линий магнитной индукции внешнего магнитного поля.





2. Выяснить, увеличивается ли поток магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром, или уменьшается.

3. Установить направление линий магнитной индукции магнитного поля индукционного тока по правилу Ленца.

4. Зная направление линий магнитной индукции, определить направление индукционного тока, пользуясь *правилом буравчика*.

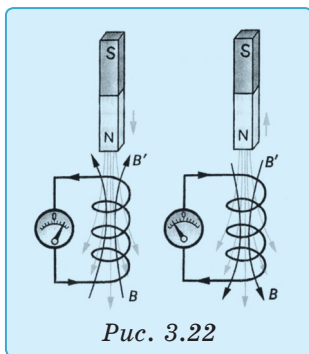


Рис. 3.22

### 3.4.5. Самоиндукция

**Самоиндукция** — это возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока (открыта в 1832 г. американским ученым Дж. Генри).

ЭДС индукции возникает при изменении магнитного потока. Если это изменение вызывается собственным током, то говорят об ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  — скорость изменения силы тока;

$L$  — индуктивность контура, или его *коэффициент самоиндукции*.





### 3.4.6. Индуктивность

**Индуктивность (коэффициент самоиндукции)** — это параметр электрической цепи, который определяет ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока или (и) ее деформации.



Термином «индуктивность» обозначают также катушку самоиндукции, которая определяет индуктивные свойства цепи.

Индуктивность соленоида в воздухе определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}, [L] = 1 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{А} = 1 \text{ Гн};$$

где  $L$  — индуктивность;

$\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;

$N$  — число витков соленоида;

$S$  — площадь поперечного сечения;

$l$  — длина соленоида.

Магнитная проницаемость среды определяется по формуле:

$$\frac{L}{L_0} = \mu,$$

где  $L$  — индуктивность контура в данной среде;

$L_0$  — индуктивность контура в вакууме.

### 3.4.7. Энергия магнитного поля

Энергия магнитного поля:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

