

Лекция №1.

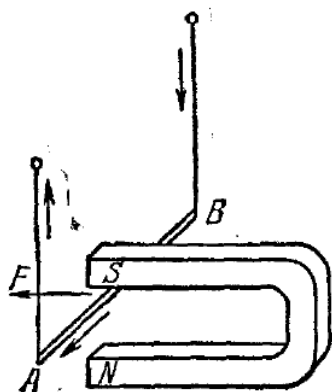
МАГНЕТИЗМ

Магнитное взаимодействие

Опыт показывает, что в природе существует взаимодействие подобное электрическому, но отличное от него. Так, если взять два постоянных магнита, то между ними возможно как взаимное отталкивание, так и взаимное притяжение. Но при этом эти два тела оказываются электрически нейтральными.

Подобная ситуация возникает при взаимодействии электрических токов. Два прямых параллельных проводника, по которым текут электрические токи, притягиваются, если токи текут в одном направлении и отталкиваются, если в противоположных. Проводники с током электрически нейтральны. Следовательно, в этом случае появляются силы взаимодействия, которые не могут быть объяснены кулоновским взаимодействием. Эти силы называются *магнитными силами*.

Для того чтобы показать, что в этих двух примерах имеет место одно и тоже физическое явление нужно каким-нибудь образом объединить эти две ситуации в одну. Действительно, такой опыт легко придумать (см. рис.)



Размещая проводник с током между полюсами подковообразного магнита можно получить, что проводник с током будет либо втягиваться в магнит, либо выталкиваться из него.

Подобно тому, как покоящийся электрический заряд действует на другой заряд посредством электрического поля, электрический ток действует на другой ток посредством *магнитного поля*.

Неподвижные заряды не создают магнитного поля. Источниками магнитного поля являются движущиеся в вакууме или в какой-либо среде заряды (токи) и постоянные магниты. Магнитное поле постоянных магнитов также вызывается движением зарядов (электронов) в атомах вещества самого магнита. По существу магнитное поле создается только движущимися зарядами.

Магнитное поле не оказывает действия на покоящиеся заряды. Оно действует на заряды, движущиеся в вакууме или в среде, т.е. на токи. Действие магнитного поля на магниты сводится, в конечном счете, к действию его на заряды, которые движутся в атомах вещества.

Учение об электромагнетизме основано на двух положениях:

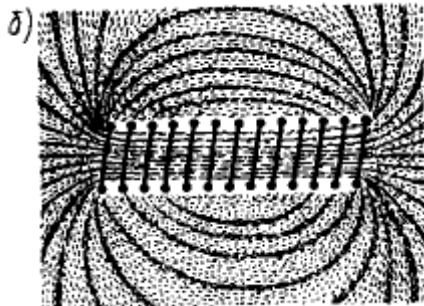
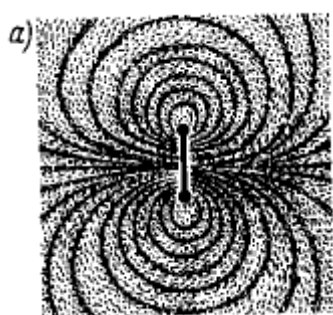
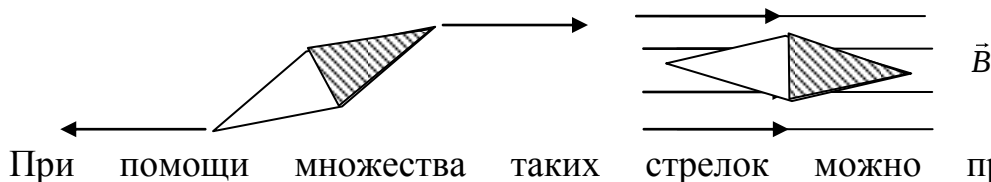
1. Магнитное поле действует на токи и (или) движущиеся заряды.
2. Магнитное поле возникает вокруг токов и движущихся зарядов.

Чтобы разобраться во всем многообразии явлений магнетизма, наблюдаемых в природе, начнем с рассмотрения простых законов, лежащих в основе этих явлений.

Вектор магнитной индукции. Сила Ампера.

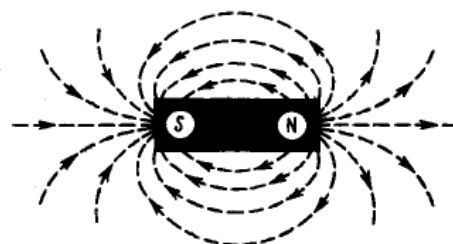
Подобно вектору напряженности электростатического поля $\vec{E}$, силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$.

Для визуализации магнитного поля внесем в него маленькую магнитную стрелку. Она повернется и установится по полю



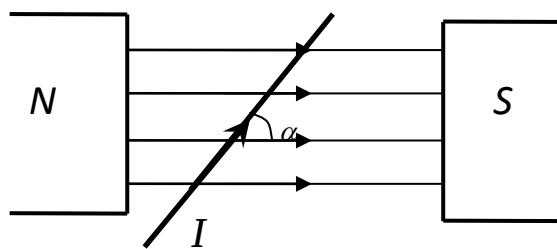
Будем изображать силовые линии магнитного

поля такими линиями, касательные к которым, параллельны маленьким магнитным стрелкам. Договорились считать, что силовые линии направлены от северного полюса N к южному S . Силовые линии полосового магнита представлены на следующем рисунке.



Линии напряженности электростатического поля $\vec{E}$ начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, а сила, действующая в этом поле на заряд, направлена по касательной к линии напряженности. В отличие от силовых линий электростатического поля, линии магнитного поля замкнуты. Это связано с отсутствием в природе “магнитных зарядов”.

Для количественного описания явления влияния магнитного поля на проводник с током рассмотрим следующий эксперимент (см. рис.)



Опыт показывает, что сила, действующая на ток в магнитном поле, зависит от величины данного поля, длины проводника, силы тока и расположения этого тока (угла α). Данная сила носит название силы Ампера, а соответствующее выражение закон Ампера:

$$\vec{F}_A = I[\vec{l}, \vec{B}],$$

где в квадратных скобках записано векторное произведение векторов, вектор $\vec{l}$ имеет длину равную длине проводника помещенного в магнитное поле, а его направление совпадает с направлением силы тока. Вектор $\vec{B}$ называется вектором **магнитной индукции**, которая измеряется в теслах (Тл). Закон Ампера (силу Ампера) можно переписать в скалярном виде

$$F_A = IlB\sin\alpha,$$

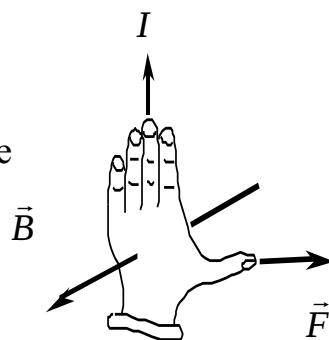
где α - угол между линиями магнитной индукции и направлением силы тока.

В случае неоднородного магнитного поля на бесконечно малый элемент тока $Id\vec{l}$ действует бесконечно малая сила Ампера $d\vec{F}_A$

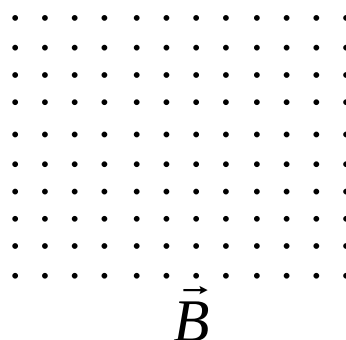
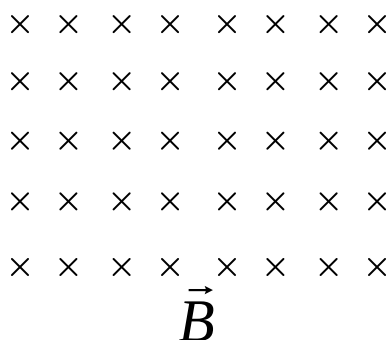
$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l}, \vec{B}]$$

Направление силы Ампера можно найти с помощью правила левой руки:

- располагаем левую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь;
- четыре вытянутых пальца показывают направление тока в проводнике;
- тогда большой отогнутый палец покажет направление силы $\vec{F}$.



Очевидно, что линии магнитного поля направлены таким образом, что в каждой точке пространства касательный к ним вектор совпадает по направлению с вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Если вектор $\vec{B}$ лежит в плоскости листа, то его изображение не представляет трудности. Если вектор $\vec{B}$ перпендикулярен к плоскости листа, то его договорились изображать *крестиком*, если вектор направлен от "нас". И *точкой*, если – к "нам". Тоже самое касается для изображения направления силы тока или скорости движущегося заряда.



Магнитное поле направлено от "нас". Магнитное поле направлено к "нам".

Сила Лоренца.

Лоренц предположил, что сила Ампера объясняется тем, что магнитное поле действует на движущиеся заряды в проводнике. Как мы знаем из раздела «Электростатика и постоянный ток» для силы тока I существует выражение

$$I = qn\nu S,$$

где q - заряд, который движется в проводнике (как правило, это электроны с зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл),

$n = N/V$ - концентрация носителей заряда (число зарядов, деленное на объем который они занимают),

ν - скорость направленного движения этих зарядов,

S - площадь поперечного сечения проводника.

Подставим это выражение в формулу силы Ампера

$$F_A = IlB\sin\alpha = qn\nu SlB\sin\alpha = q \frac{N}{V} \nu VB\sin\alpha = qN\nu B\sin\alpha,$$

где мы подставили выражение для концентрации $n = N/V$ и заметили, что произведение длины проводника на его площадь поперечного сечения $Sl = V$ равно объему проводника.

Отсюда имеем

$$\frac{F_A}{N} = q\nu B\sin\alpha,$$

где слева стоит сила, действующая на одиночный заряд, которая называется силой Лоренца. Таким образом, формула силы Лоренца в скалярном виде записывается как

$$F_L = q\nu B\sin\alpha.$$

Этому выражению можно придать и векторный вид

$$\vec{F}_L = q[\vec{\nu}, \vec{B}].$$

Направление силы Лоренца также удобно определять по *правилу левой руки* (см. предыдущий пункт). Только в этом случае необходимо слова – *направление силы тока* заменить – на *направление скорости движения заряда* и добавить четвертый пункт.

Правило левой руки для силы Лоренца:

- а) располагаем левую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь;
- б) четыре вытянутых пальца показывают направление скорости движения заряда (т.е. $\vec{\nu}$);
- в) тогда большой отогнутый палец покажет направление силы $\vec{F}$;
- г) если заряд отрицательный, то направление силы $\vec{F}$ нужно поменять на противоположное.

Движение заряженных частиц в магнитном поле.

Рассмотрим движение частицы массой m и зарядом q в постоянном однородном магнитном поле $\vec{B}$. Линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости чертежа и направлены за чертеж (от нас). Рассмотрим самый простой случай, когда скорость частицы $\vec{v}$ перпендикулярна вектору $\vec{B}$. Частица движется по окружности радиусом R , поскольку сила, действующая на нее – сила Лоренца, в каждой точке траектории перпендикулярна скорости и направлена к центру окружности, то она является центростремительной силой:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Так как $\vec{v} \perp \vec{B}$, то $\alpha = 90^\circ$, следовательно $\sin \alpha = 1$ и $F_L = qvB$.

С другой стороны на заряд действует центробежная сила $\vec{F}_ц$ направленная от центра окружности

$$F_ц = \frac{mv^2}{R}.$$

Эти две силы компенсируют друг друга, следовательно, модули этих сил равны, т.о.

$$\frac{mv^2}{R} = qvB.$$

Откуда находим

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Радиус окружности уменьшается с увеличением магнитной индукции поля $\vec{B}$ и возрастает пропорционально скорости частицы.

Вычислим период обращения частицы по окружности, т.е. время, за которое она совершает один оборот. Разделим длину окружности на скорость частицы:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q}.$$

Период не зависит от скорости частицы и определяется только отношением ее заряда к массе и индукцией магнитного поля $\vec{B}$.

Отношение заряда к массе $\frac{q}{m}$ называется **удельным зарядом** частицы.

Независимость периода от скорости используется в *циклотроне* – циклическом ускорителе заряженных частиц.

