Тема: Магнитное поле

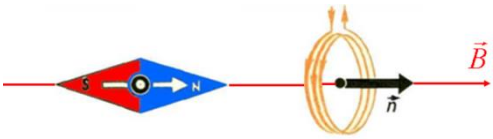
Магнитным полем называется особый вид материи, не воспринимаемый органами чувств человека и оказывающий силовое воздействие на магниты, проводники и контуры с током, а так же на движущиеся заряженные частицы и тела.

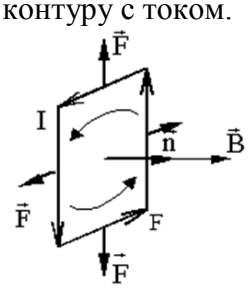
Основные характеристики магнитного поля

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$

Основной силовой характеристикой, характеризующей магнитное поле в данной точке пространства, является ***вектор магнитной индукции*** $\vec{B}$ (бэ).

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ (бэ) - это векторная физическая величина, направление которой в данной точке поля совпадает с направлением, которое указывает в этой точке северный полюс магнитной стрелки или положительная нормаль к контуру с током.





За направление магнитного поля принимают направление вектора положительной нормали $\vec{n}$ в данном месте расположения контура с током.

Положительной называют нормаль, восстановленную в центре контура, удовлетворяющую ***правилу буравчика*** (или правилу ***правого винта***):

если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в контуре, то поступательное движение буравчика укажет направление положительной нормали.

Есть три основных способа определения величины вектора магнитной индукции в данной точке поля, которые основаны на силовом воздействии магнитного поля на контур с током, проводник с током или движущийся заряд:

Магнитной индукцией B в данной точке магнитного поля называется физическая величина, численно равная отношению максимального вращающего момента сил, действующего в данной точке поля на контур с током, к произведению силы тока I в нём и площади поверхности данного контура:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m} = \frac{M_{\max}}{I\,S},$$

где $M_{\max}$ - максимальный вращающий момент сил, действующий на контур с током в данной точке магнитного поля,

$p_{\text{m}} = IS$ - магнитный момент контура с током, I - сила тока в контуре, S - площадь контура,

или

магнитной индукцией B в данной точке магнитного поля называется физическая величина, равная отношению максимальной силы $F_{\max}$, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный проводник с током, к произведению силы тока I в нём на длину данного проводника l:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\,l},$$

где $F_{\max}$ - максимальная сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током,

I - сила тока в проводнике, l - длина прямолинейного проводника,

или

магнитной индукцией B в данной точке магнитного поля называется физическая величина, равная отношению максимальной силы $F_{\max}$, действующей со стороны магнитного поля на движущийся точечный заряд, к произведению величины этого заряда на его скорость:

$$B = \frac{F_{\max}}{|q|\,v},$$

где $F_{\max}$ - максимальная сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд,

$|q|$ - модуль заряда, v - скорость заряда.

Измеряется магнитная индукция в Теслах: $[B] = Тл$, Тесла.

Вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ (аш)

Использовать вектор магнитной индукции B не всегда удобно, поскольку его величина зависит от свойств среды. Поэтому вводится вспомогательная характеристика магнитного поля, величина которой от свойств среды не зависит. Эту величину назвали ***вектором напряжённости магнитного поля*** $\vec{H}$.

Измеряется вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ (аш) в амперах на метр: $[H]=\left[\frac{A}{м}\right]$,

причём
$$\vec{B}=\mu\mu_0\vec{H},$$

где $\mu=\frac{B_{в\ веществе}}{B_{в\ вакууме}}$ - магнитная проницаемость вещества (величина табличная), $[\mu]=[безразмерная]$,

Для воздуха и вакуума μ = 1.

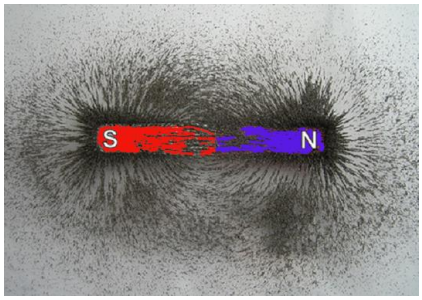
$B_{в\ веществе}$ - индукция магнитного поля в веществе, $Тл$;

$B_{в\ вакууме}$ - индукция магнитного поля в вакууме, $Тл$;

$\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}\frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная.

Физический смысл магнитной проницаемости вещества μ: она показывает, во сколько раз вещество усиливает магнитное поле по сравнению с вакуумом.

Взаимодействие магнитов

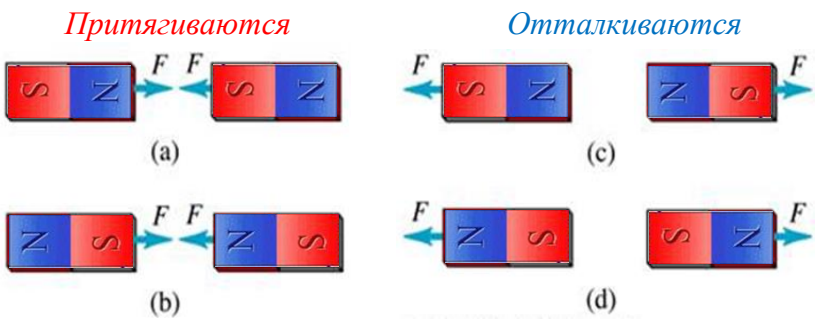


В 1269 г. французский исследователь П. Марикур помещая металлически опилки вблизи магнита, обратил внимание на то, что они определённым образом ориентируются вокруг него (см. рис). Этим было показано, что в пространстве вокруг магнита существует силовое взаимодействие, которое назвали ***магнитным***. Линии, образуемые железными опилками в магнитном поле, стали называть ***силовыми линиями магнитного поля***.

Затем он изготовил магнит в виде тонкого длинного стержня, который будучи подвешенным на ниточке, всегда ориентировался в направлении север-юг, то есть один конец магнитной стрелки всегда показывал направление на север, а другой – на юг. В связи с этим П. Марикур ввел понятие ***магнитного полюса***. Таким образом, любой магнит обладает двумя полюсами. Полюс, указывающий направление на север, назвали северным ***N*** (Nord), а на юг - южным ***S*** (Sude). Северный полюс магнитной стрелки обычно окрашивают в синий цвет, а южный полюс – в красный цвет.

В зависимости от того, какими концами друг к другу повёрнуты магниты, они либо притягивались, либо отталкивались

Одноимённые полюса отталкиваются, а разноимённые – притягиваются

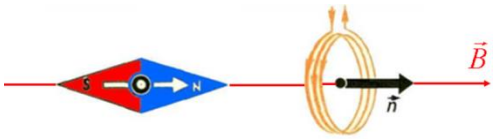


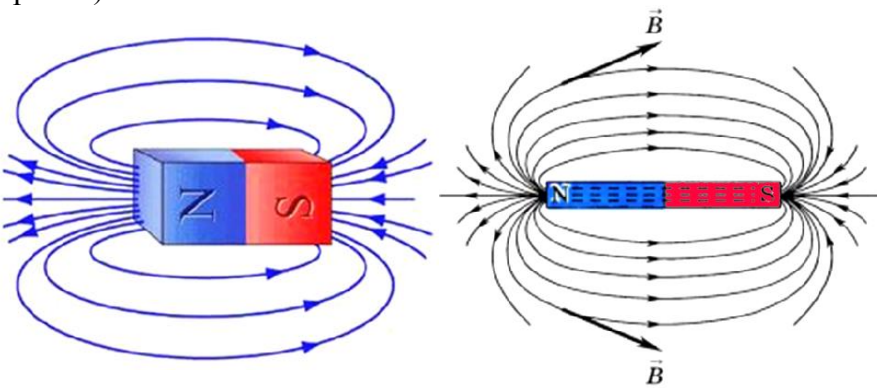
Графическое изображение магнитных полей

Магнитные поля графически изображаются с помощью *силовых линий*.

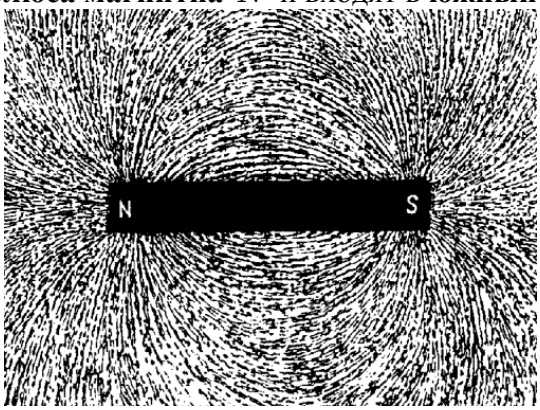
Силовой линией магнитного поля называется линия, касательная в каждой точке которой совпадает по направлению с вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

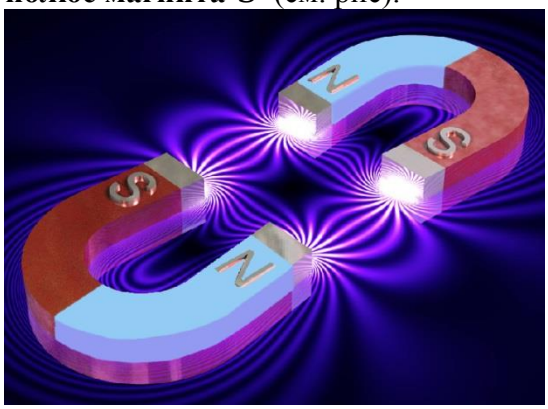
(за направление вектора магнитной индукции в данной точке поля выбрали направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки в этой точке поля, или направление, которое совпадает с направлением положительной нормали замкнутого контура с током (положительная нормаль направлена в ту же сторону, куда перемещается буравчик, если его вращать по направлению тока в рамке)





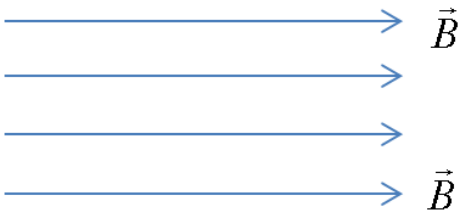
Любой магнит всегда имеет северный N и южный S полюса. Принято, что силовые линии выходят из **северного полюса магнитна** N и входят в **южный полюс магнита** S (см. рис).





В природе не существует магнитных зарядов, поэтому силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Такие поля называются ***вихревыми***.

Однородным магнитным полем называется поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции имеет одну и ту же величину и направление.



Линии индукции однородного магнитного о поля так же, как и линии напряженности однородного электростатического поля, изображаются параллельными прямыми, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга.

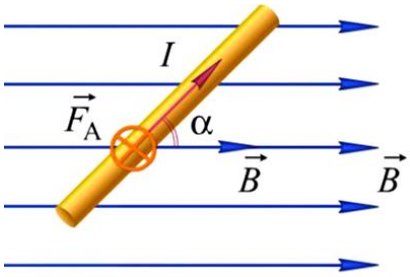
Чем чаще линии, тем больше величина магнитной индукции в данной области этого поля.

Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они не имеют ни начала, ни конца и они всегда замкнуты.

Сила Ампера $\vec{F}_A$

Сила Ампера $\vec{F}_A$ *- это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.*

$$d\vec{F}_A = I\left[d\vec{l}\,\vec{B}\right] \text{ или } dF_A = IdlB\sin\alpha,$$

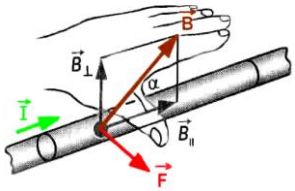


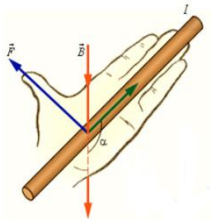
где I – сила тока в проводнике, A

B – магнитная индукция, $Тл$

$d\vec{l}$ – вектор элемента тока, $м$ (направлен по направлению тока)

α – угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{B}$



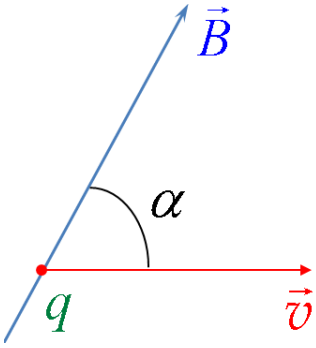


Силовое воздействие на проводник с током в магнитном поле используется во всех электроизмерительных приборах и электрических машинах.

Сила Лоренца $\vec{F}_Л$

Сила Лоренца $\vec{F}_Л$ *- это сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряды*)

$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{v}\vec{B}\right] \text{ или } F_Л = |q|vB\sin\alpha,$$



где

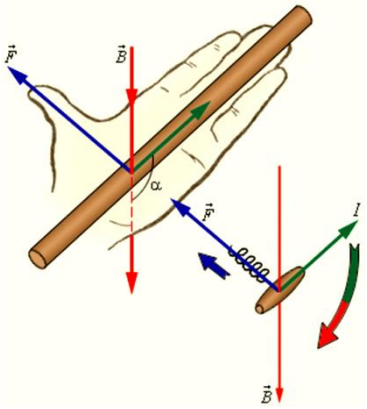
B – магнитная индукция, $Тл$; q – заряд, $Кл$; v – скорость заряда, $м/с$;

α – угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Лоренца определяется:

- для положительных зарядов по правилу ЛЕВОЙ РУКИ,

- для отрицательных зарядов по правилу ПРАВОЙ РУКИ

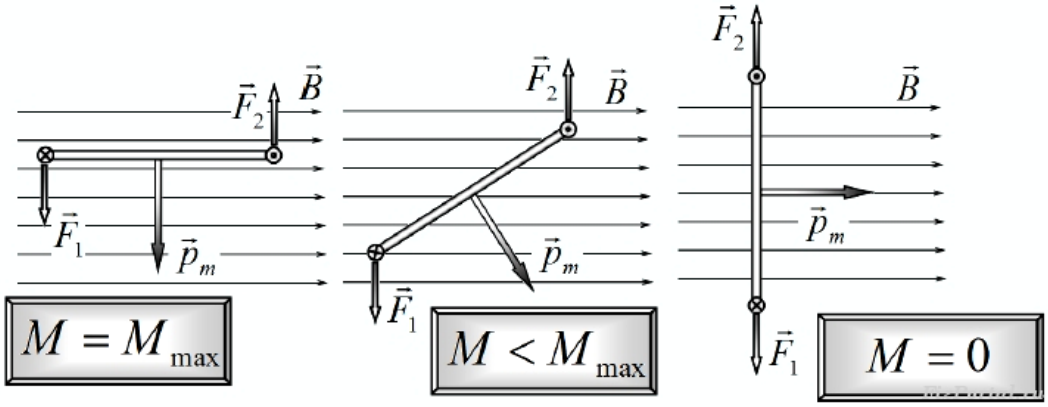


Движение заряженных частиц в магнитном поле

- если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле параллельно силовым линиям этого поля, то сила Лоренца на неё действовать не будет (так как $\alpha = 0$, следовательно $\sin 0 = 0$) и частица будет двигаться вдоль силовой линии ,
- если заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям этого поля, то на неё будет действовать максимальная по величине сила Лоренца (так как $\alpha = 90^0$, то $\sin 90 = 1$), направленная перпендикулярно силовым линиям поля и частица будет двигаться по окружности,
- если заряженная частица влетает в магнитное поле под некоторым углом $\alpha \neq 0$ к силовым линиям этого поля, то частица будет двигаться по винтовой траектории вдоль силовой линии магнитного поля.

Механический момент сил M, действующий на замкнутый контур с током в магнитном поле

Контуры с током, вносимые в магнитное поле испытывают ориентирующее действие со стороны этого поля. Форма контура роли не играет. Таким образом, на рамку с током в магнитном поле на противоположные стороны рамки действует пара сил $\vec{F}$, которая создаёт механический вращающий момент сил M. Опыт показывает, что этот момент сил M зависит от ориентации контура с током в магнитном поле. Максимальный момент действует на рамку с током, когда плоскость рамки расположена вдоль силовых линий магнитного поля, а если контур расположен перпендикулярно силовым линиям, то результирующий момент сил равен нулю (см. рис)



Величину механического вращательного момента M, действующего на рамку с током в магнитном поле, можно определить по формуле:

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \vec{B}\right] \quad \text{или} \quad M = IBS\sin\alpha = p_m B \sin\alpha,$$

где M - механический момент сил, $[M] = H \cdot м$, Ньютон – метр;

B - магнитная индукция, $Тл$;

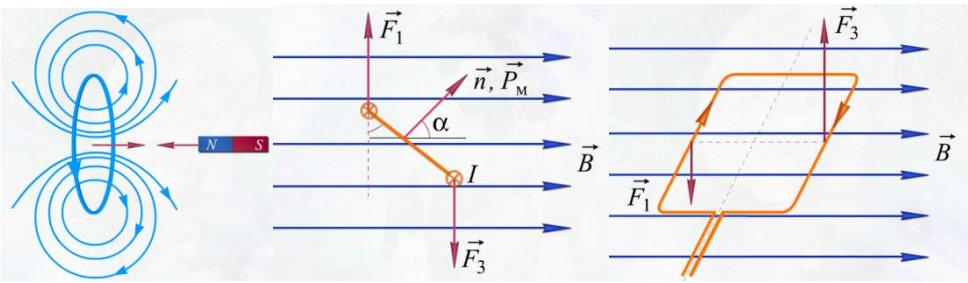
$\vec{p}_m = I\,S\,\vec{n}$ - вектор магнитного момента контура с током, $[p_m] = A \cdot м^2$ (Ампер-метр квадратный)

где $\vec{n}$ - вектор положительной нормали к плоскости контура с током,

$p_m = IS$ - модуль магнитного момента контура с током, $A \cdot м^2$;

I - сила тока в контуре, A; S – площадь контура, $м^2$

α - угол между векторами $\vec{n}$ (или $\vec{p}_m$) и $\vec{B}$.



Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле

Контур с током в магнитном поле обладает потенциальной энергией

$$W_П = -\left(\vec{p}_m \vec{B}\right) = -p_m B cos\alpha,$$

где $W_П$ - потенциальная энергия контура с током в магнитном поле, *Дж*;

B - магнитная индукция, *Тл*;

$p_m = IS$ - модуль магнитного момента контура с током, $A \cdot м^2$.

I - сила тока в контуре, *А*; S – площадь контура, $м^2$

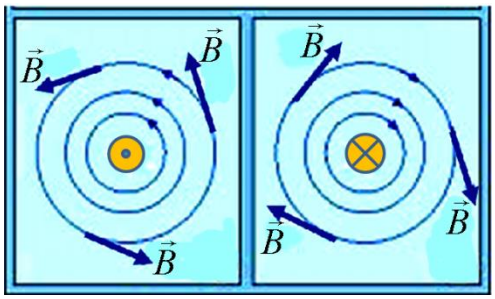
α - угол между векторами $\vec{n}$ (или $\vec{p}_m$) и $\vec{B}$.

В обоих положениях механический вращающий момент $M = 0$, следовательно эти положения являются состояниями равновесия. Но только положение рамки для $\alpha = 0^\circ$ является устойчивым. Другое положение ($\alpha = 180^\circ$) будет неустойчивым, поскольку в этом положении потенциальная энергия рамки с током максимальна и достаточно малейшего отклонения от положения равновесия, чтобы возник вращающий момент, удаляющий её от этого положения.

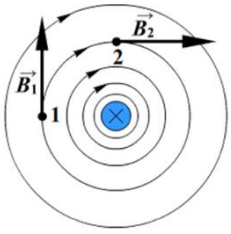
Таким образом, рамка с током, помещённая в магнитном поле на неподвижной оси вращения, ведёт себя точно так же, как и стрелка компаса.

Магнитное поле проводника с током

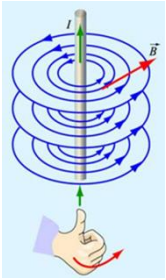
Любой проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле, которое обнаруживается по его действию на железные опилки или на магнитные стрелки.



Силовые линии проводника с током имеют вид концентрических окружностей (то есть окружностей с общим центром), расположенных перпендикулярно проводнику.

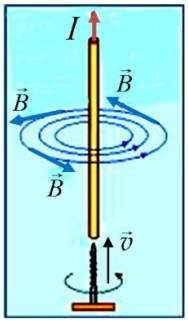


Напомню, что вектор магнитной индукции $\vec{B}$ в каждой точке силовой линии направлен по касательной (см. рисунки).



Направление силовых линий вектора магнитной индукции $\vec{B}$ определяется по правилу ***правой руки:***

если обхватить проводник с током правой рукой так, чтобы большой палец совпадал с направлением тока в проводнике, то остальные пальцы руки укажут направление силовых линий магнитного поля этого тока.



Направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ прямолинейного проводника с током можно определить и по ***правилу буравчика:***

если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Закон Био-Савара-Лапласа

(позволяет определить магнитную индукцию, создаваемую элементом проводника с током)

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{l}\,\vec{r}\right]}{r^3} \qquad (1)$$

или $$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\alpha}{r^2},$$

где dB - магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника с током $d\vec{l}$, *Тл*;

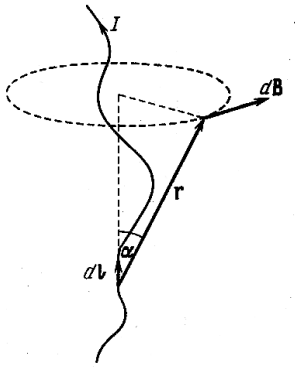
μ - магнитная проницаемость вещества, в котором находится контур с током;

$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}\,\frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная; I - сила тока в проводнике, *А*;

$d\vec{l}$ - вектор элемента тока, равный по модулю длине dl проводника и совпадающий по направлению с током, *м*;

$\vec{r}$ - радиус-вектор, проведенный от середины элемента проводника dl к точке пространства, магнитная индукция в которой определяется, *м*.

α - угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{r}$.



Направление вектора $d\vec{B}$ определяется, исходя из векторного характера уравнения (1), по правилу буравчика:

Если рукоятку буравчика вращать по кратчайшему повороту от первого сомножителя в векторном произведении $d\vec{l}$ ко второму $\vec{r}$, то поступательное движение буравчика укажет направление вектора $d\vec{B}$.

Принцип суперпозиции для магнитного поля

(позволяет определить характеристики результирующего магнитного поля)

Если в пространстве имеется несколько проводников с токами, то в каждой точке пространства магнитное поле создаётся каждым из проводников в отдельности независимо от наличия остальных.

Результирующая магнитная индукция поля в каждой точке пространства определяется по ***принципу суперпозиции***:

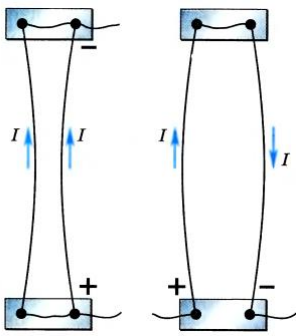
результирующий вектор магнитной индукции в данной точке поля равен сумме векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке.

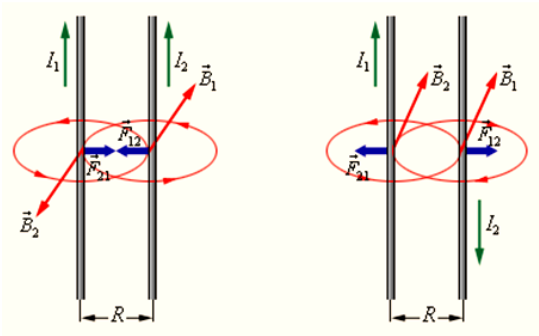
$$\vec{B}_{рез} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_n \quad \text{или} \quad \vec{H}_{рез} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \ldots + \vec{H}_n$$

Силовое взаимодействие параллельных проводников с током

Наблюдения показывают, что если через параллельные проводники пропускать *ток одного направления*, то они притягиваются друг к другу, а если *ток противоположного направления* – то отталкиваются, таким образом, проводники с током оказывают силовое воздействие друг на друга, которое нельзя объяснить наличием электрического поля, так как в целом проводники электрически нейтральны.

Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют ***магнитными силами***.





Силу магнитного взаимодействия двух прямолинейных параллельных проводника с током можно определить по формуле:

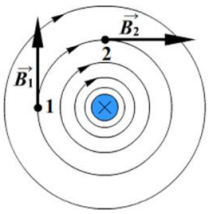
$$F_{магн} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{r} l \quad ,$$

где I_1 и I_2 - силы тока в проводниках, A; r - расстояние между проводниками, *м*;
l - длина проводника, *м*.

Магнитное поле прямолинейного бесконечно длинного проводника с током

Используя закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции можно получить следующую формулу:

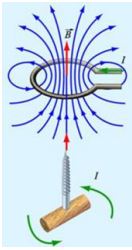
$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$



где I -сила тока в проводнике, A;
r - расстояние от центра проводника до рассматриваемой точки пространства, *м*.

Магнитное поле в центре кругового витка с током

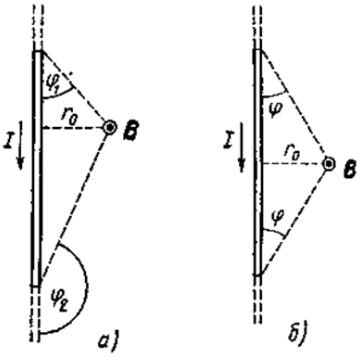
$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R},$$



где I - сила тока в витке с током, A;
R - радиус кругового витка с током, *м*.

Магнитное поле прямолинейного проводника с током конечной длины

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r_0}(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2),$$



где I - сила тока в витке с током, A;

Обозначения ясны из **рис. а).** Вектор индукции $\vec{B}$ перпендикулярен плоскости чертежа, направлен к нам и поэтому изображен точкой.

При симметричном расположении концов проводника относительно точки, в которой определяется магнитная индукция (**рис. б**),

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r_0}\cos\varphi.$$

Магнитное поле движущегося с постоянной скоростью точечного заряда

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v}\vec{r}]}{r^3} \qquad (2)$$

или $$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{q v \sin\alpha}{r^2},$$

где B - магнитная индукция, создаваемая движущимся зарядом, *Тл*;
μ - магнитная проницаемость вещества, в котором находится контур с током;
$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}\frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная; I - сила тока в проводнике, A;
q -электрический заряд, *Кл*;
v - скорость электрического заряда q относительно наблюдателя, находящегося в рассматриваемой точке пространства, $\frac{м}{с}$;
$\vec{r}$ - радиус-вектор, проведенный от заряда в рассматриваемую точку пространства, *м*;
α - угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{r}$.

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется, исходя из векторного характера уравнения (2), по **правилу буравчика**:

Если рукоятку буравчика вращать по кратчайшему повороту от первого сомножителя в векторном произведении $\vec{v}$ ко второму $\vec{r}$, то поступательное движение буравчика укажет направление вектора $\vec{B}$.

Таким образом, движущийся заряд q одновременно создаёт вокруг себя электрическое и магнитное поля.

Из относительного характера скорости $\vec{v}$ следует, что одновременно в одних системах отчёта имеются и электрическое и магнитное поля, а в других, относительно которых заряд покоится, только электрическое поле.

Циркуляция вектора $\vec{B}$

Циркуляцией вектора магнитной индукции $\vec{B}$ вдоль произвольного замкнутого контура L называется интеграл вида:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \oint_L B_l dl,$$

где B_l - проекция вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на направление элементарного перемещения $d\vec{l}$ вдоль контура L.

Теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$ в вакууме
(закон полного тока для магнитного поля в вакууме)

Циркуляция вектора $\vec{B}$ в вакууме вдоль произвольного замкнутого контура L, равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму сил токов $\sum_{i=1}^{n} I_i$, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^{n} I_i,$$

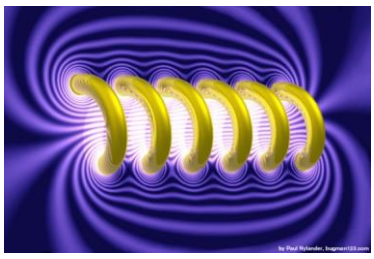
где μ_0 — магнитная постоянная; $\sum_{i=1}^{n} I_i$ - алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром;

Правило знаков для токов:

Ток считается положительным, если он создаёт магнитное поле в направлении положительного обхода контура L, в противном случае ток считается отрицательным.

Используя теорему о циркуляции вектора $\vec{B}$ можно определить магнитное поле соленоида (катушки с током) и тороида с током.

Магнитное поле бесконечно длинного соленоида с током



$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} = \mu\mu_0 In,$$

где I - сила тока в соленоиде, *м*;

$n = \frac{N}{l}$ - число витков на единицу длины соленоида, $\frac{1}{м}$;

μ - магнитная проницаемость сердечника соленоида.

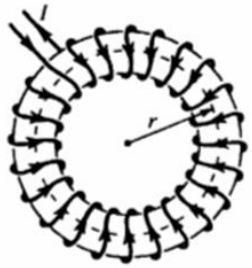
Особенность магнитного поля бесконечно длинного соленоида с током:

- магнитное поле сосредоточено только внутри бесконечного соленоида (вне соленоида магнитного поля нет),
- Внутри соленоида магнитное поле однородно.

Магнитное поле соленоида конечной длины напоминает магнитное поле полосового магнита (см. рис)

Магнитное поле тороида с током

$$B = \mu\mu_0 I \frac{N}{2\pi R} = \mu\mu_0 In,$$



где I - сила тока в тороиде, *м*;

$n = \frac{N}{l}$ - число витков на единицу длины тороида, $\frac{1}{м}$;

R -радиус средней линии тороида, *м*;

μ - магнитная проницаемость сердечника тороида.

Особенность магнитного поля тороида с током:

- магнитное поле сосредоточено только внутри тороида (вне тороида магнитного поля нет).