

ВЕКТОРНЫЕ ПОЛЯ

Методическое пособие

Разработано учителем

Высшей категории

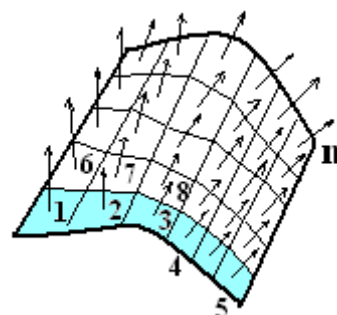
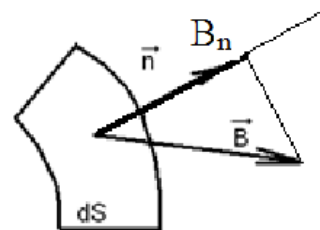
Бибиковым Д.Н

Н.Новгород

2018г.

1. ВЕКТОРНЫЕ ПОЛЯ.

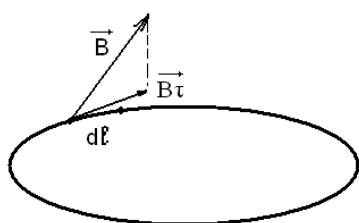
Существует четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Вся совокупность элементарных частиц с их взаимодействиями проявляет себя в форме вещества и поля. Поле в отличие от вещества обладает особыми свойствами. Оно распределено в пространстве и передаёт взаимодействие. Электромагнитное поле может существовать самостоятельно, например свет, радиоволны. Они имеют конечную скорость распространения. Гравитационное поле реально ощутимо вокруг массивных тел. Источником электромагнитного поля являются движущиеся заряженные частицы. Взаимодействие зарядов происходит по схеме частица – поле – частица. Схема гравитационного взаимодействия, вероятно, такая же. В некоторых условиях поле может оторваться от источника и свободно распространяться в пространстве. Такое поле носит волновой характер.



Состояние материальной точки задавалось её положением в пространстве и её скоростью. Такой способ описания непригоден для полей. Основное свойство полей - передача взаимодействия (силы). Поле определено, если для каждой точки пространства известны значения **вектора напряжённости**. **Напряжённость поля – вектор численно равный силе действующей на тело, обладающего единицей величины, характеризующей данное взаимодействие.** Линии, в каждой точке которой вектор напряжённости является касательным, называются силовыми линиями или линиями вектора напряжённости.

Для описания векторных полей очень удобным оказываются понятия **потока и циркуляции поля**.

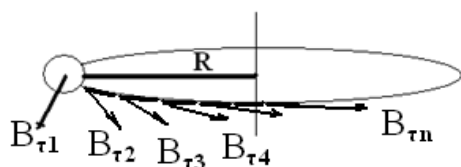
Элементарный поток векторного поля \vec{B} через поверхность ΔS равен



$\Delta\Phi = B_n \cdot \Delta S$, где $\Delta\Phi$ – элементарный поток вектора \vec{B} , B_n – проекция вектора \vec{B} на нормаль к поверхности, ΔS – элементарная поверхность. Для того, что бы вычислить полный поток вектора \vec{B} через поверхность необходимо сложить элементарные потоки.

$$\sum_{n=1}^{\infty} (B_n \cdot \Delta S) = (B_n)_1 \cdot \Delta S_1 + (B_n)_2 \cdot \Delta S_2 + (B_n)_3 \cdot \Delta S_3 + (B_n)_4 \cdot \Delta S_4 + (B_n)_5 \cdot \Delta S_5 + \dots + (B_n)_n \cdot \Delta S_n$$

В короткой записи это выглядит так: $\Phi = \int B_n \cdot dS$



Элементарная циркуляция векторного поля \vec{B} вдоль замкнутого контура равна

$\Delta\Gamma = B_\tau \cdot \Delta\ell$, где $\Delta\Gamma$ – элементарная циркуляция вектора \vec{B} , B_τ – проекция вектора \vec{B} на касательную к точке контура, $\Delta\ell$ - длина элементарного участка контура. Полную циркуляцию по замкнутому контуру

можно вычислить, если сложить элементарные циркуляции.

$$\Gamma = \sum_{n=1}^{\infty} (B_\tau \cdot \Delta\ell) = B_{\tau 1} \cdot \ell + B_{\tau 2} \cdot \ell + B_{\tau 3} \cdot \ell + B_{\tau 3} \cdot \ell + \dots B_{\tau n} \cdot \ell \text{ или}$$

$$\Gamma = \oint_L B_\tau \cdot d\ell$$

2. ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Движение жидкости и газа описывается векторным полем скоростей. Рассмотрим движение воды в ручье. Движение спокойное без водоворотов (ламинарное). У ручья есть исток и сток. Если для каждой точечной массы воды изобразить вектор скорости, то совокупность этих векторов будет являться векторным полем - полем скоростей. Траектории движения частиц - создадут линии тока.

В каждой точке линии тока скорость является касательной. Поверхность, образованная линиями тока, проведёнными через все точки малого замкнутого контура, называется **трубкой тока**. Часть жидкости или газа, заключённая в трубке тока называется **струйкой**.

Движение жидкости называется **установившемся** или **стационарным**, если поле её скоростей не изменяется.

Пусть за одну секунду через поперечное сечение S_1 проходит количество воды объёмом $\Phi = V/t$. Φ – поток жидкости или объёмный расход.

$$\Phi = \frac{V}{t} = \frac{\ell S}{t} = vS.$$

Поток вектора скорости через поверхность S равен $\Phi = vS \cos \alpha$, где α – угол между вектором скорости и нормалью (перпендикуляр) к поверхности. Пусть каждая частица, поглощаясь поверхностью S_1 действует на неё с силой $\vec{F}_0 = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ или $\vec{F}_0 = \frac{m_0 \Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Найдём силу, действующую со стороны всех частиц. Для этого необходимо умножить обе части уравнения на число частиц, падающих на площадку.

$$N \vec{F}_0 = \frac{N m_0 \Delta \vec{v}}{\Delta t} \text{ или } \vec{F} = \frac{m \Delta \vec{v}}{\Delta t}; \vec{F} = \frac{\rho \Delta V \Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

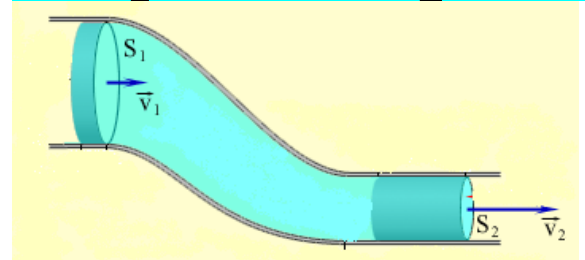
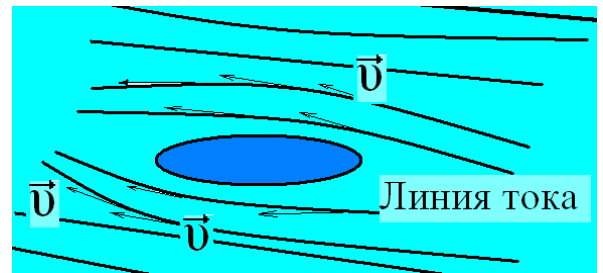
$$\Delta V = \ell \cdot S_1 \text{ или } F = \frac{\rho \ell S_1 \Delta v}{\Delta t}; \frac{\ell}{\Delta t} - \text{средняя скорость, которая равна } \frac{v}{2}$$

. Найдём давление, производимое на поверхность. Для этого разделим обе части уравнения на площадь S_1 .

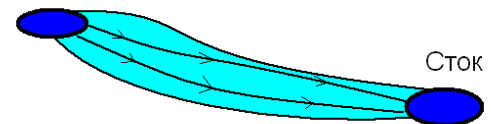
Тогда получим $p = \frac{\rho v S_1 \Delta v}{2 S_1}$. За промежуток времени t значение скорости меняется от v до 0. $\Delta v = v$.

$$p = \frac{\rho v^2}{2}.$$

Давление, производимое на поверхность, перпендикулярную вектору скорости равно плотности кинетической энергии. Это давление называется динамическим или скоростным напором.



Источник, исток

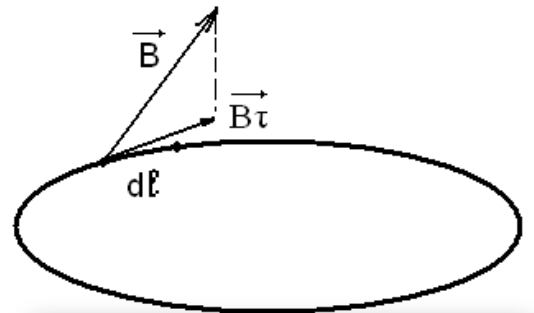


Сток

Поток жидкости имеет начало – исток, и конец – сток. Заметим, что линии тока выходят из истока, а входят в сток.

3. ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ. ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ.

Турбулентное течение - форма течения жидкости или газа, при которой вследствие наличия в течении многочисленных вихрей различных размеров жидкие частицы совершают хаотическое неустановившиеся движения по сложным траекториям. Рассмотрим вихревое поле скоростей. Примером вихревого поля скоростей может служить водный водоворот в ванне, когда мы начинаем спускать воду, воздушные вихри-смерчи. Идеальное вихревое поле – поле линии напряжённости которого являются замкнутыми. Элементарная циркуляция вектора скорости частиц воды по участку контура ℓ равна $\Delta\Gamma = v_\tau \cdot \Delta\ell$, если в качестве контура взять окружность, то из соображений симметрии, значение скорости в каждой точке будет одинаково по модулю и скорость тела будет являться касательной к каждой точке окружности. Тогда циркуляция вектора скорости равна



$$\Gamma = v \cdot 2\pi r, \text{ откуда}$$

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r}$$

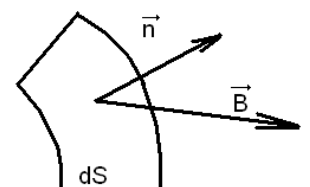
4. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

Гравитационное поле – особый вид материи, передающий гравитационное взаимодействие. Это пространство вокруг массивных тел. Примером гравитационного взаимодействия является взаимодействие между Землёй и Луной, Солнцем и планетами, и т.д. Частный случай гравитационного взаимодействия – сила тяжести. Внесём в гравитационное поле Земли небольшое тело. В данной точке отношение силы тяжести к массе тела величина постоянная и зависит только от массы Земли.

Для гравитационного поля **напряжённость** поля равна

$$\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}, \left[\frac{\text{Н}}{\text{кг}} \right]$$

Для изображения полей используют линии напряжённости. Линии напряжённости это линии в каждой точке которой вектор



напряжённости является касательным. Напряжённость – как скорость в потоке воды, а линии напряжённости – линии тока.

Для описания полей используют понятия **поток поля** и **циркуляция поля**.

Элементарный поток векторного поля равен произведению нормальной составляющей вектора на площадь поверхности, которую он пронизывает. $\Delta\Phi = \vec{B}n \cdot \Delta S$ или $d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n})$. Для вычисления полного потока через некоторую поверхность необходимо проинтегрировать данное выражение.

Представим сферу вокруг Земли. Поток напряжённости пронизывает сферу. Полный поток напряжённости гравитационного поля Земли равен

$$\Phi = GS,$$

где S – площадь сферы, G – напряжённость гравитационного поля Земли.

Поток напряжённости гравитационного поля Земли пропорционален источнику поля, т.е. массе Земли M . $\Phi = \kappa M$. Отсюда $GS = \kappa M$, откуда напряжённость гравитационного поля

образованного Землёй, или другим сферическим телом равна $G = \frac{\Phi}{4\pi R^2}$ или $G = \frac{\kappa M}{4\pi R^2}$

$$G = \gamma \frac{M}{R^2},$$

где γ – гравитационная постоянная

Найдём силу, действующую на тело массой m .

$$F = Gm \text{ или}$$

$$F = \gamma \frac{mM}{R^2},$$

Эта формула выражает закон всемирного тяготения.

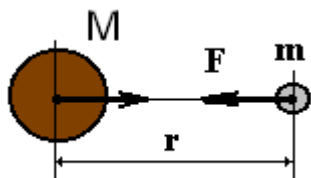
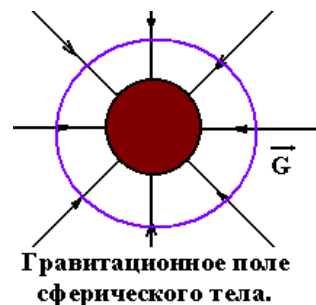
Два сферических или точечных тела притягиваются с силой прямо пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между их центрами.

$$\gamma = (6,670 \pm 0,006) \times 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{кг}$$

Вблизи поверхности Земли ускорение, с которым движутся тела, можно считать постоянным и оно называется ускорением свободного падения \vec{g} . Силу можно вычислить по второму закону Ньютона. $F = mg$. Эта сила называется силой тяжести, но $F = Gm$ отсюда $\vec{G} = \vec{g}$. **Напряжённость гравитационного поля равна ускорению свободного падения.**

Массу определяют взвешиванием. $m = \frac{F_T}{g}$, где F_T – сила тяжести.

Первоначально (XVII—XIX века) масса характеризовала «количество вещества» в физическом объекте, от которого, по представлениям того времени, зависели как способность объекта

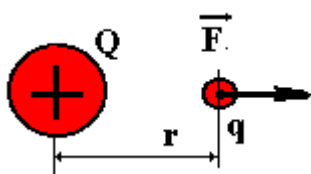


сопротивляться изменению скорости от приложенной силы (инертность), так и гравитационные свойства — вес.

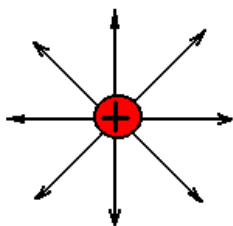
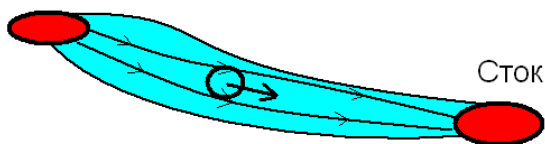
В современной физике понятие «количество вещества» имеет другой смысл, а концепцию «массы» можно трактовать несколькими способами:

- **Пассивная гравитационная масса** показывает, с какой силой тело взаимодействует с внешними гравитационными полями — фактически эта масса положена в основу измерения массы взвешиванием в современной метрологии.
- **Активная гравитационная масса** показывает, какое гравитационное поле создаёт само это тело — гравитационные массы фигурируют в законе всемирного тяготения.
- **Инертная масса** характеризует инертность тел и фигурирует в одной из формулировок второго закона Ньютона. Если произвольная сила в инерциальной системе отсчёта одинаково ускоряет разные исходно неподвижные тела, этим телам приписывают одинаковую инертную массу.

Гравитационные и инертная масса равны друг другу (с высокой точностью — порядка 10^{-13} — экспериментально, а в большинстве физических теорий, в том числе всех, подтверждённых экспериментально — точно), поэтому в том случае, когда речь идёт не о «новой физике», просто говорят о массе, не уточняя, какую из них имеют в виду. Масса при скоростях много меньших скорости (классическая механика) света является постоянной, а при скоростях близких к скорости света зависит от скорости движения тела (релятивистская механика).



Источник, исток



**Электрическое поле
положительного заряда**

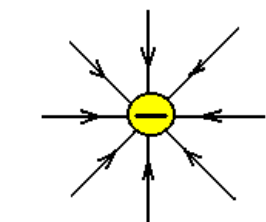
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Из курса 8 класса известно, что все тела состоят из атомов. Атомы состоят из положительного ядра и электронов. Возьмём положительно заряженное тело зарядом Q (тело у которого не хватает некоторого количества электронов, $Q = ne$, где n – число потерянных электронов e – заряд одного электрона, а заряд мера электрического взаимодействия) и внесём в него небольшой пробный заряд q . Заряженное тело Q будет отталкивать тело зарядом q , как будто из Q вытекает некая жидкость (эфир, физический вакуум) и уносит тело q . Вокруг заряженного тела Q создаётся электрическое поле, которое передаёт взаимодействие на тело q . Тогда напряжённость поля, созданного большим зарядом (сила, действующая на единичный, положительный заряд, внесённый в поле заряда Q), будет направлена от центра большого заряда $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, $[\frac{H}{Kл} = \frac{B}{м}]$.

где q – величина, характеризующая электрическое взаимодействие и называемая зарядом (измеряется в Кулонах). Линии напряжённости (линия, в каждой точке которой вектор напряжённости является касательным), будут выглядеть так, как на рисунке. Куда бы мы не поместили пробный заряд, на него будет действовать сила, направленная по линии, соединяющей

центры тел. Положительный заряд, будет отталкиваться от положительного, вытекать из источника и притягиваться к отрицательному заряду, втекать в сток.

Представим вокруг заряда Q сферу. Тогда поток вектора напряжённости электрического поля \vec{E} равен $\Phi = EScos\alpha$. По теореме Остроградского-Гаусса $\Phi = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0}$, где Q – сумма зарядов, находящихся внутри сферы или заряд образующий поле, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 – электрическая постоянная. Тогда $ES = Q/\epsilon\epsilon_0$, а $S = 4\pi R^2$. Отсюда



Электрическое поле отрицательного заряда

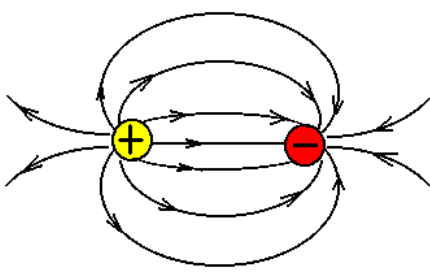
$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2},$$

тогда сила взаимодействия между точечными или сферическими телами равна

$$F = qE \text{ или } F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2}$$

Эта формула выражает закон Кулона

Сила взаимодействия между покоящимися точечными заряженными телами прямо пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.



Электрическое поле диполя

Электрическое взаимодействие осуществляется по схеме **тело-поле-тело**.

Электромагнитное взаимодействие – это взаимодействие электронов и протонов. Классическое представление о строении атома (планетарная модель) таково: в центре атома находится ядро, состоящее из протонов и нейтронов (частиц, не имеющих заряда), а вокруг ядра подобно планетам движутся электроны по своим орбитам. Положительный заряд ядра равен отрицательному заряду всех электронов и в сумме заряд равен нулю, т.е. атом нейтрален. Сумма протонов и нейтронов приблизительно равна массе ядра, выраженной в атомных единицах массы, и называется массовым числом. Сумма протонов называется зарядовым числом.

Проведём аналогии между полем скоростей и электрическим полем. С точки зрения математики всё, что написано ниже одно и то же, только буквы разные. Если считать, что источником струйки или потока жидкости является массовый расход жидкости, то

$$\Phi = vS; \quad \Phi = \frac{1}{\rho} \left(\frac{m}{t} \right); \quad p = \frac{\rho v^2}{2} \quad \omega = \frac{\rho v^2}{2}$$

Если считать, что источником электрического поля является заряд, а $\frac{1}{\rho}$ аналогична $\frac{1}{\epsilon\epsilon_0}$, то

$$\Phi = ES; \quad \Phi = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} Q; \quad p = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} \quad \omega = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$$

Поэтому, если для потока жидкости давление равно плотности кинетической энергии, то для электрического поля давление, оказываемое на заряженную плоскость, находящуюся в электрическом поле равно плотности энергии электрического поля.

Найдём энергию электрического поля, образованного двумя разноимённо заряженными параллельными пластинами (конденсатор). Плотность энергии электрического поля равна

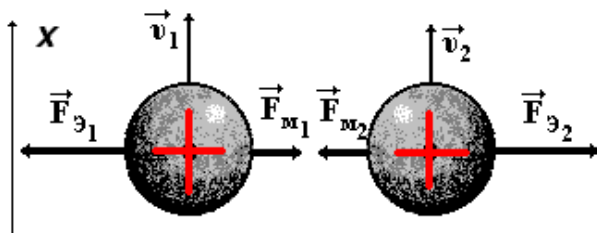
$$\omega = \frac{W}{V}$$

Где ω – плотность энергии, W – энергия электрического поля, V – объём поля. Отсюда $W = \omega V$. Объём между пластинами равен $V = dS$, где d – расстояние между пластинами, S – площадь пластины.

$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} \cdot dS$. Из курса физики 8 класса известно, что напряжение между пластинами конденсатора U , это работа по перемещению единичного положительного заряда. Работа по определению это сила, умноженная на перемещение. Тогда для единичного заряда имеем $qU = qEd$, $U = Ed$, где d – перемещение заряда вдоль силовой линии. Подставляя в формулу для энергии электрического поля $E = \frac{U}{d}$ получаем $W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2d^2} \cdot dS$, или $W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2d} \cdot S$, или

$$W = \frac{CU^2}{2}, \text{ где } C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} - \text{электрическая ёмкость плоского конденсатора.}$$

6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



При движении одноимённых зарядов в одном направлении сила взаимодействия (отталкивания) уменьшается, а в разных – увеличивается. Силу взаимодействия можно представить как

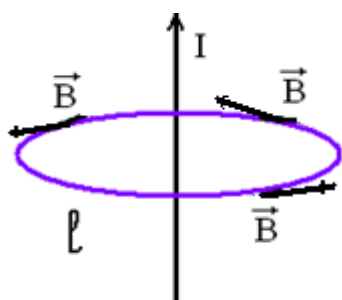
$$F = F_e - F_m(v), \text{ где}$$

F – сила электромагнитного взаимодействия, F_e – сила электрического

взаимодействия между покоящимися зарядами, – сила электрическая, электростатическая, кулоновская, электрическая составляющая электромагнитного взаимодействия. $F_m(v)$ – сила магнитного взаимодействия. В чистом виде магнитное взаимодействие наблюдается между проводниками с током, когда электрическое взаимодействие компенсируется. Вокруг проводника с током возникает магнитное поле, которое передаёт взаимодействие второму проводнику с током и наоборот. Характеристикой магнитного поля является напряжённость магнитного поля. За направление напряжённости магнитного поля берётся направление свободно установившейся магнитной стрелки. Рассмотрим магнитное поле прямого тока. Магнитные стрелки (компасы) выстраиваются перпендикулярно проводнику (опыт Эрстеда). Линии напряжённости будут представлять собой окружности. Магнитное поле, образованное проводником с током является вихревым и описывается циркуляцией вектора \vec{H} , но чаще пользуются другой характеристикой магнитного поля **вектором магнитной индукции поля \vec{B}** . Вектор магнитной индукции аналогичен напряжённости магнитного поля \vec{H} . $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ и численно равен силе, действующей на

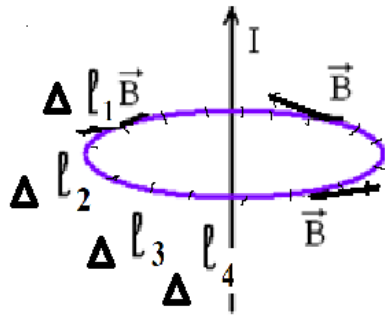
проводник с током длиной 1 метр, находящийся в магнитном поле по которому протекает ток 1 ампер.

$\mu \mu_0$ – соответственно относительная магнитная проницаемость среды и магнитная постоянная.



$$B = \frac{F}{Il}$$

За направление вектора магнитной индукции берётся направление свободно установившейся магнитной стрелки. Куда бы мы ни поставили компас (магнитную стрелку) около провода с током, всегда она будет располагаться, перпендикулярно проводу (опыт Эрстеда). Из опыта Эрстеда следует, что линии вектора магнитной индукции – концентрические окружности.



Циркуляция вектора магнитной индукции вдоль окружности равна:

$$\Gamma = \sum_{n=1}^{\infty} B \tau \Delta \ell.$$

Исходя из симметрии окружности и однородности пространства - B – постоянная величина. Тогда

$$\Gamma = B(\Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + \Delta \ell_3 + \Delta \ell_4 + \dots). \Gamma = B\ell, \Gamma = B \cdot 2\pi R.$$

Источником магнитного поля являются токи. Закон полного тока гласит: циркуляция индукции магнитного поля пропорциональна сумме токов охваченных контуром $\Gamma = \mu\mu_0 I$, отсюда $B \cdot 2\pi R = \mu\mu_0 I$, а

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

Из формулы $B = \frac{F}{\ell I}$, следует, что сила, действующая на проводник с током в однородном магнитном поле равна $F = B\ell I$. С учётом того, что $[\vec{B} \cdot \vec{\ell}]$ – векторное произведение, модуль силы равен

$$F = B\ell I \sin \alpha.$$

Это сила Ампера. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Очевидно, что если сила Ампера действует на проводник с током (движущимися зарядами), то на каждый движущийся заряд действует сила.

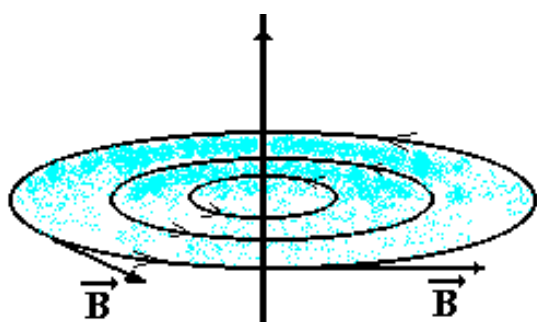
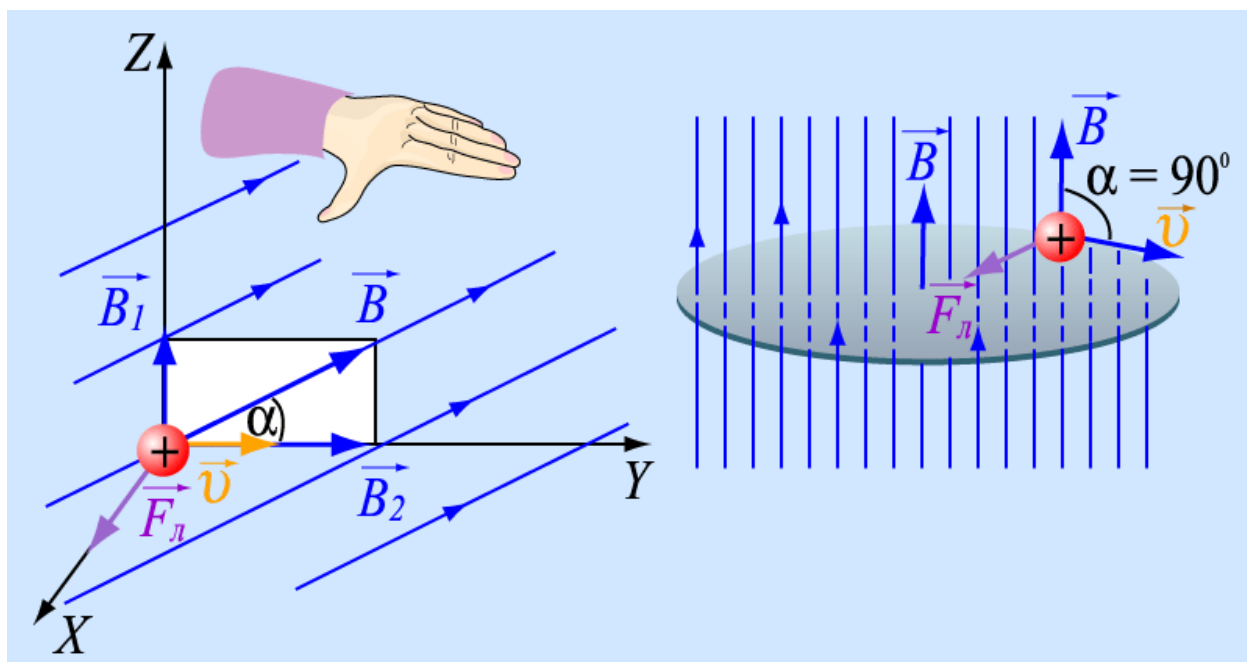
Сила тока – это заряд, проходящий по проводнику за единицу времени. $I = Q/t$,

Тогда $F = \frac{qN\ell B}{t} \sin \alpha$, где q заряд одной частицы, а N – число частиц, а если разделить обе части уравнения на число частиц, находящихся в проводнике, то получим силу, действующую на один заряд – силу Лоренца.

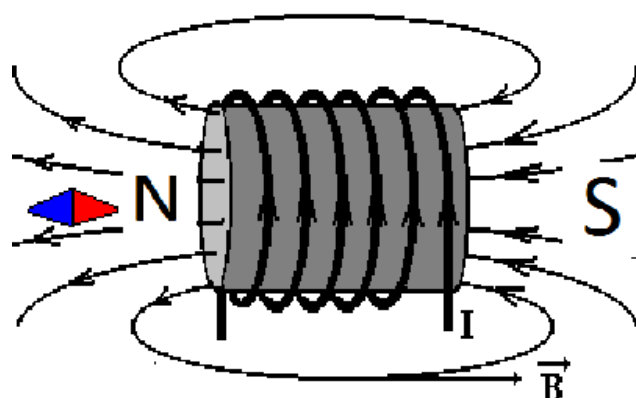
$$F_L = qvB \sin \alpha,$$

где α – угол между скоростью и вектором магнитной индукции. Направление силы (сила Лоренца) и силы Ампера определяется по правилу левой руки.

Линии магнитной индукции входят в ладонь. Четыре пальца по направлению силы тока или по направлению движения положительного заряда, против отрицательного. Большой отогнутый палец даёт направление силы Ампера и силы Лоренца.



Магнитное поле прямого провода с электрическим током.



Магнитное поле катушки с током

Магнитное поле изображается линиями магнитной индукции. Линия магнитной индукции – это линия в каждой точке которой, вектор индукции магнитного поля является касательным. Линии индукции магнитного поля являются замкнутыми линиями, а магнитное поле, называется вихревым полем.

Направление линий определяется по северному концу магнитной стрелки.

Направление линий магнитной индукции определяется так же по правилу «буравчика»: Если направление поступательного движения буравчика (правого винта) совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линии магнитной индукции и наоборот, если направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением электрического тока в катушке, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением линий магнитной

индукции.

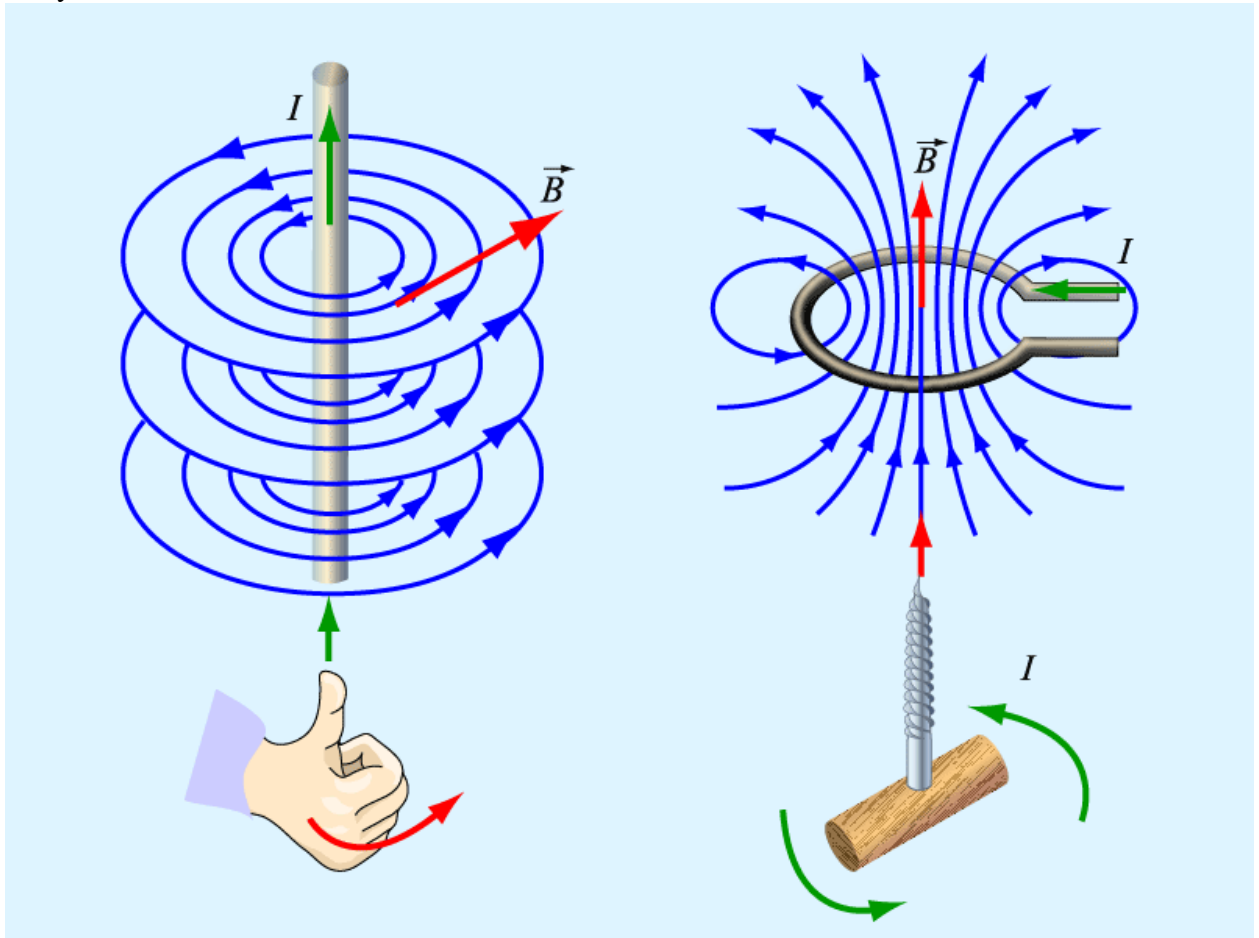


Рисунок 1 правило правой руки и правило "буравчика"

Если длина соленоида (электрической катушки) много больше её диаметра, то магнитное поле внутри можно считать однородным. Линии магнитной индукции параллельны, а величина вектора магнитной индукции одинакова во всех точках.

Определим индукцию магнитного поля внутри длинной катушки (соленоид). Выберем замкнутый контур (линия красного цвета). Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру равна:

$$\Gamma = \sum_{n=1}^{\infty} B \tau \Delta \ell. \Gamma = B_{\text{внутр}}(\Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + \Delta \ell_3 + \Delta \ell_4 + \dots) + B_{\text{внеш}}(\Delta \ell_1 + \Delta \ell_2 + \Delta \ell_3 + \Delta \ell_4 + \dots).$$

Поле вне катушки приравняем к нулю, в данный момент оно нас не интересует. Тогда $\Gamma = B\ell$, где ℓ - длина катушки. По закону полного тока $B \cdot \ell = \mu\mu_0 I N$, где N – число витков катушки. Отсюда

$$B = \mu\mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

Магнитное поле также обладает энергией. Плотность энергии рассчитывается по формуле, аналогичной плотности энергии векторных полей (поля скоростей и поля электростатического).

$$\omega = \frac{\rho v^2}{2} \quad \omega = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} \quad \omega = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Или используя вектор магнитной индукции

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

Определим энергию магнитного поля катушки с током.

$$W = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}, \quad W = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V = \frac{\left(\frac{\mu\mu_0 NI}{\ell}\right)^2}{2\mu\mu_0} \ell S = \frac{\mu\mu_0 N^2 S I^2}{2\ell} = \frac{L I^2}{2}$$

Где $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{\ell}$ - индуктивность катушки.

$$\boxed{W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}} \quad \boxed{W_{\text{э}} = \frac{CU^2}{2}} \quad \boxed{W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}}$$

Что касается силы взаимодействия между движущимися заряженными частицами, то

она будет равна:
$$\boxed{F = \frac{q_1 v_1 \cdot q_2 v_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 c^2 r^2}}$$