Поле движущихся зарядов

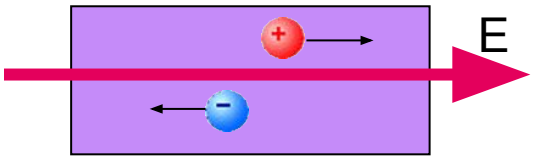
Электричество и магнетизм

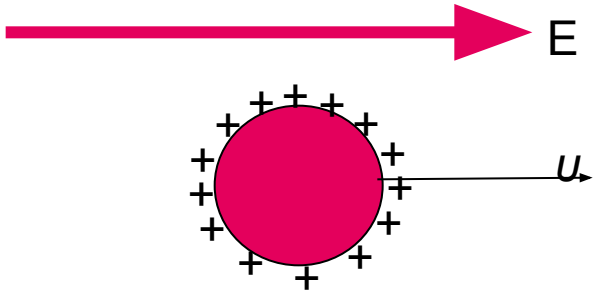
Постоянный электрический ток

Постоянный ток

- ***Электрический ток*** - упорядоченное по направлению движение электрических зарядов. За направление тока принимается направление движения ***положительных*** зарядов.
- Для возникновения и существования электрического тока в проводнике необходимо создать в нем и поддерживать электрическое поле.

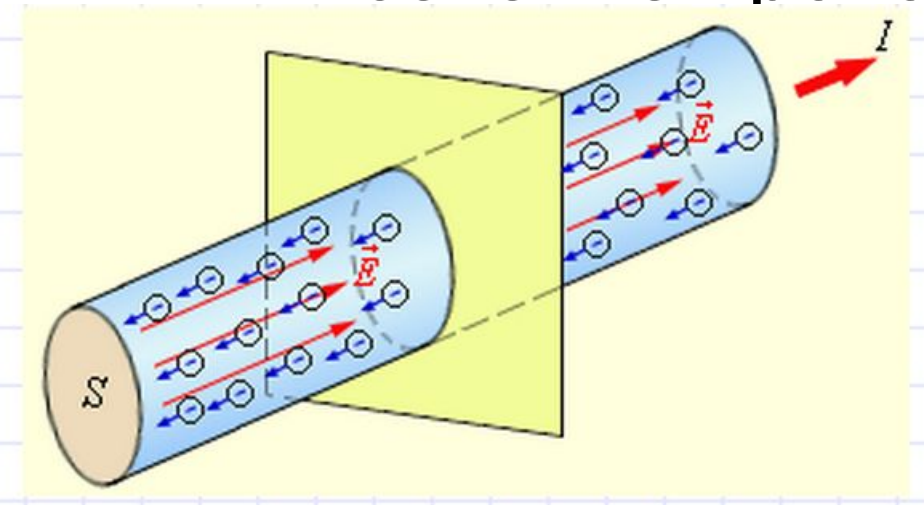
Ток проводимости Конвекционный ток





Количественная мера тока

- Ток характеризуется ***силой тока*** I – скалярной величиной, численно равной количеству переносимого электричества q за единицу времени через поперечное сечение проводника: $I=dq/dt$.



Единицы измерения

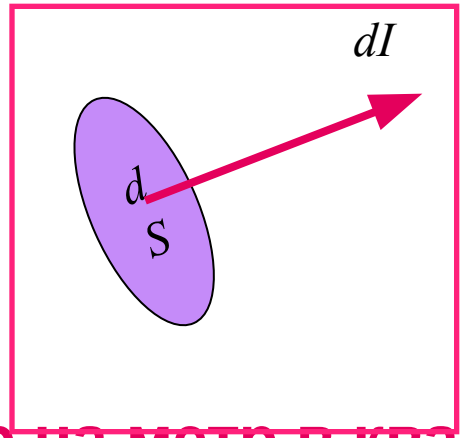
- Сила тока измеряется в ***амперах:***

$$1\text{А} = 1\text{Кл}/1c.$$

Для постоянного тока: $I = q/\text{t}$.

Используется векторная величина – ***плотность тока***: $\boldsymbol{j} = I/S$,

где S – площадь поперечного сечения проводника.

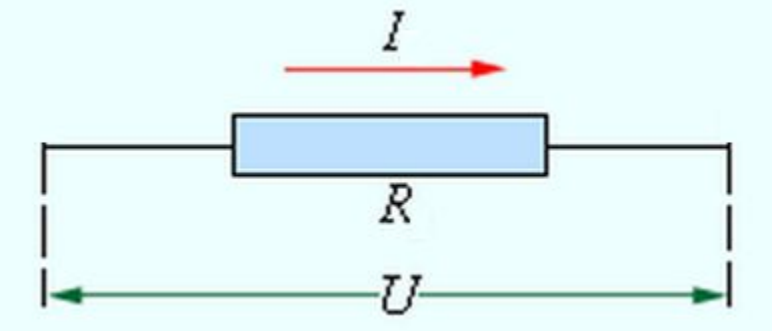


- Единица плотности тока – **ампер на метр в квадрате (А/м^2)**

Закон Ома

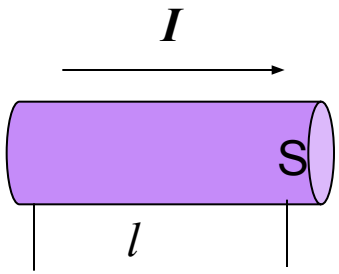
- Из обобщения результатов многих измерений в проводниках из различных материалов Г.Ом вывел ***закон Ома***, *согласно которому сила тока в проводнике (на участке не содержащем источники тока) пропорциональна напряжению* U *и обратно пропорциональна его сопротивлению* R

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}; \quad \text{или} \quad IR = U$$



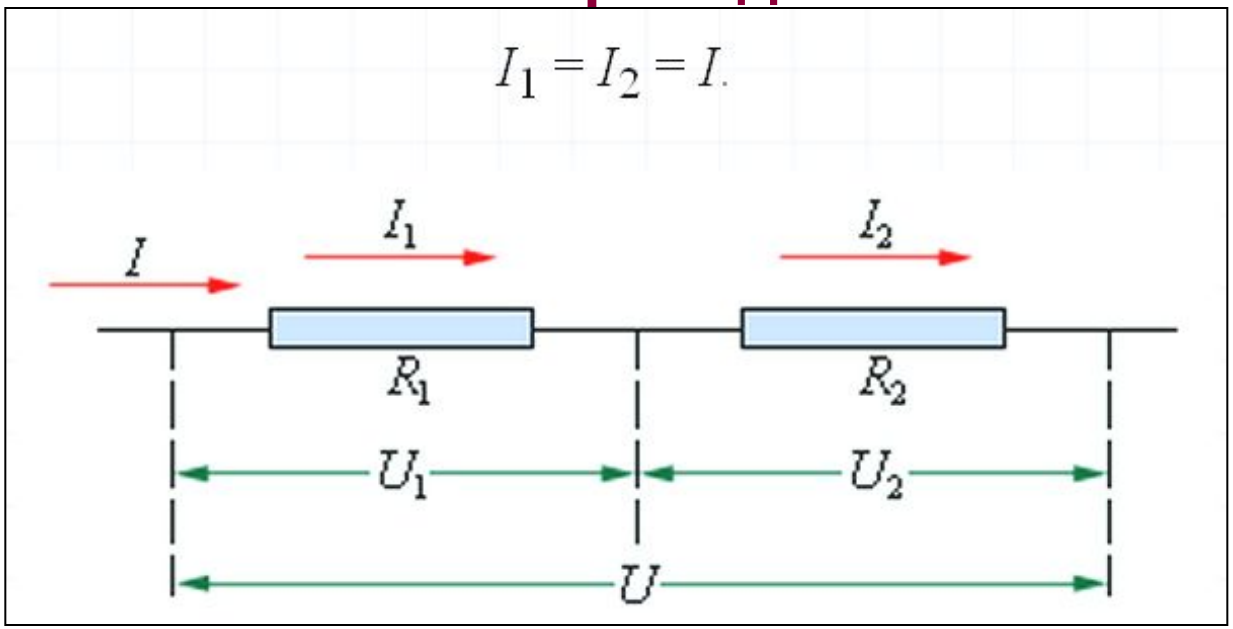
- ***Напряжение измеряется в вольтах*** - *(В)*
- ***Сопротивление проводника в Омах***:

(1 Ом = 1В/1А), и определяется его удельным сопротивлением *ρ*, длиной и площадью его поперечного сечения:



$$R = \rho \frac{l}{S}$$

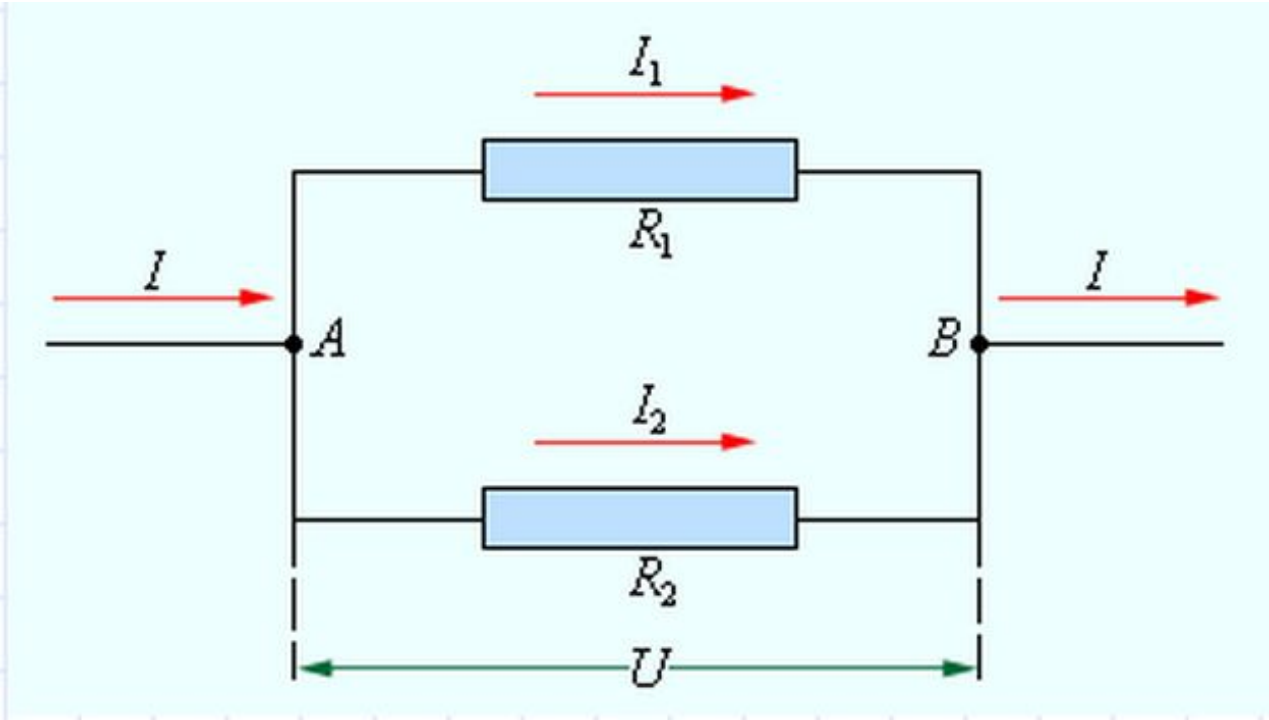
Последовательное и параллельное соединение проводников



Последовательное соединение проводников

- $U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2$
- $U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR$

$$R = R_1 + R_2.$$

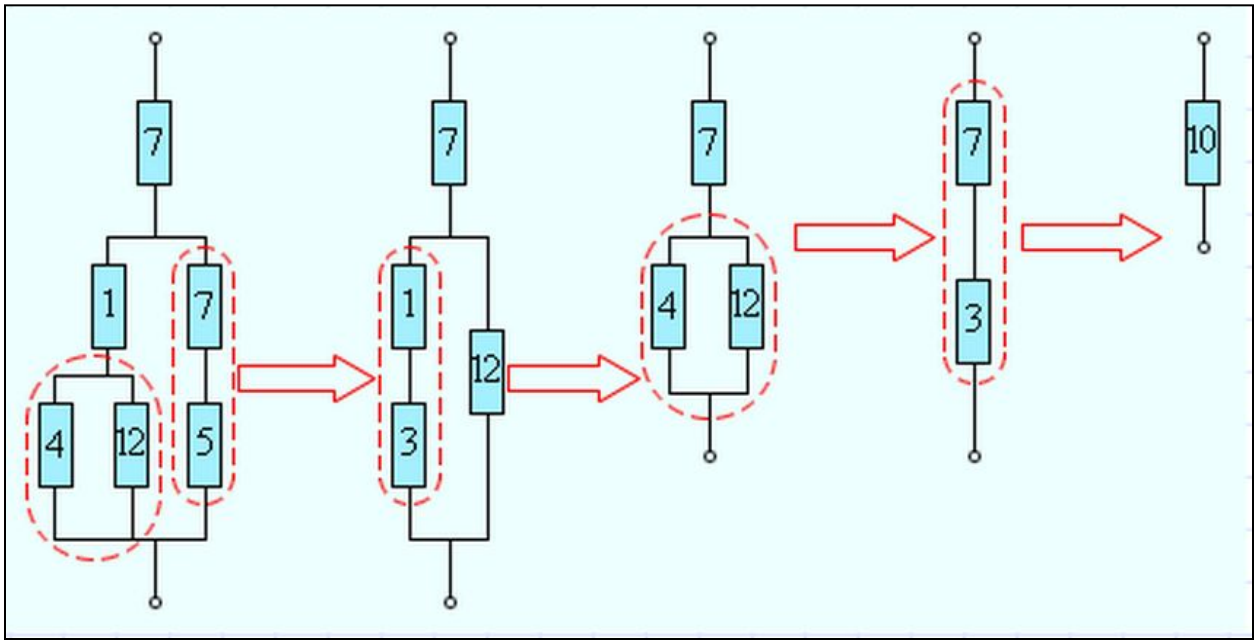


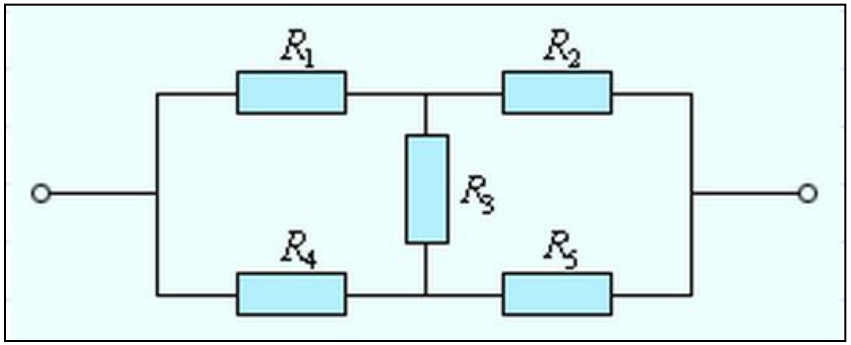
Параллельное соединение проводников

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \text{ и } I = \frac{U}{R},$$

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.}$$

Расчет сложной цепи





Пример электрической цепи, которая не сводится к комбинации последовательно и параллельно соединенных проводников

Работа тока и мощность тока

- ***Работа тока*** на участке цепи, совершаемая за время *t*, определяется как:

$$\boxed{A = IUt = I^2 Rt = U^2 t/R.}$$

(1 Дж = 1 · Н · м = 1 $м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}$)

- ***Мощность тока*** на участке цепи равна:

$$\boxed{N = A/t = IU = I^2 R = U^2/R.}$$

(1 Вт = 1 Дж/с = 1 · $м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$)

Закон Джоуля–Ленца

Работа тока проявляется в превращении электрической энергии в механическую (например, в электродвигателе), в химическую (например, при выделении из раствора химически чистого компонента), во внутреннюю (например, при *нагревании проводника*).

Работа ΔA электрического тока I, протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением R, преобразуется в тепло ΔQ, выделяющееся на проводнике

$$\Delta Q = \Delta A = R\, I^2\, \Delta t.$$

Сторонние силы.

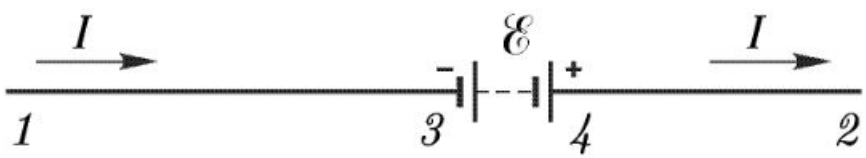
- Для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил *неэлектростатического происхождения*. Такие устройства называются ***источниками постоянного тока***.
- Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются ***сторонними силами***.

- Цепь постоянного тока можно разбить на отдельные участки.
- Те участки, на которых не действуют сторонние силы (т. е. участки, не содержащие источников тока), называются ***однородными***.
- Участки, включающие источники тока, называются ***неоднородными***.

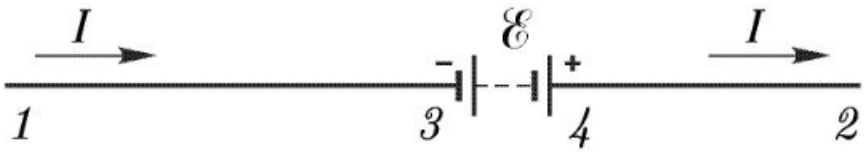
ЭДС

- При перемещении электрических зарядов по цепи постоянного тока сторонние силы, действующие внутри источников тока, совершают работу.
- Физическая величина, равная отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда Q_0 от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда, называется ***электродвижущей силой источника*** **(ЭДС):**

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст.}}{Q_0}$$



Электродвижущая сила, как и разность потенциалов, измеряется в ***вольтах*** (В).



- При перемещении единичного положительного заряда по некоторому участку цепи работу совершают как электростатические (кулоновские), так и сторонние силы. Работа электростатических сил равна разности потенциалов $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ между начальной (1) и конечной (2) точками неоднородного участка. Работа сторонних сил равна по определению электродвижущей силе $\mathscr{E}$ действующей на данном участке.

Полная работа на неоднородном участке равна:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}.$$

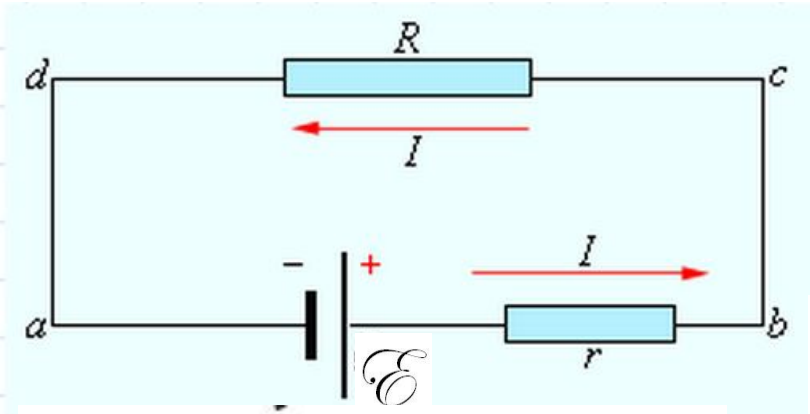
Величину U_{12} принято называть ***падением напряжения*** или просто ***напряжением*** на участке цепи 1–2

Для однородного участка напряжение равно разности потенциалов:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Закона Ома для неоднородной цепи или обобщенный закон Ома

$$IR = U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E} = \Delta\varphi_{12} + \mathscr{E}$$



Цепь постоянного тока

$$IR = \Delta\varphi_{cd}.$$

$$Ir = \Delta\varphi_{ab} + \mathscr{E}$$

$$I\,(R + r) = \Delta\varphi_{cd} + \Delta\varphi_{ab} + \mathscr{E}$$

Но $\Delta\varphi cd = \Delta\varphi ba = -\Delta\varphi ab$. Поэтому:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}.$$

- *При перемещении единичного положительного заряда по замкнутой цепи постоянного тока работа сторонних сил равна сумме ЭДС, действующих в этой цепи, а работа электростатического поля равна нулю.*

Закон Ома для участка неоднородной цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \sum \mathscr{E}}{\sum R}$$

где $\sum \mathscr{E}$ сумма всех э.д.с участка цепи

$\sum R$ сумма всех сопротивлений участка цепи

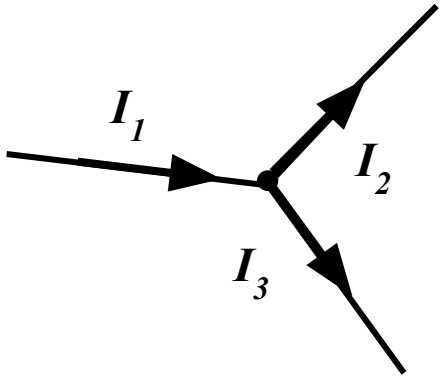
Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\sum \mathscr{E}}{R_{внутр.} + R_{внешн.}}$$

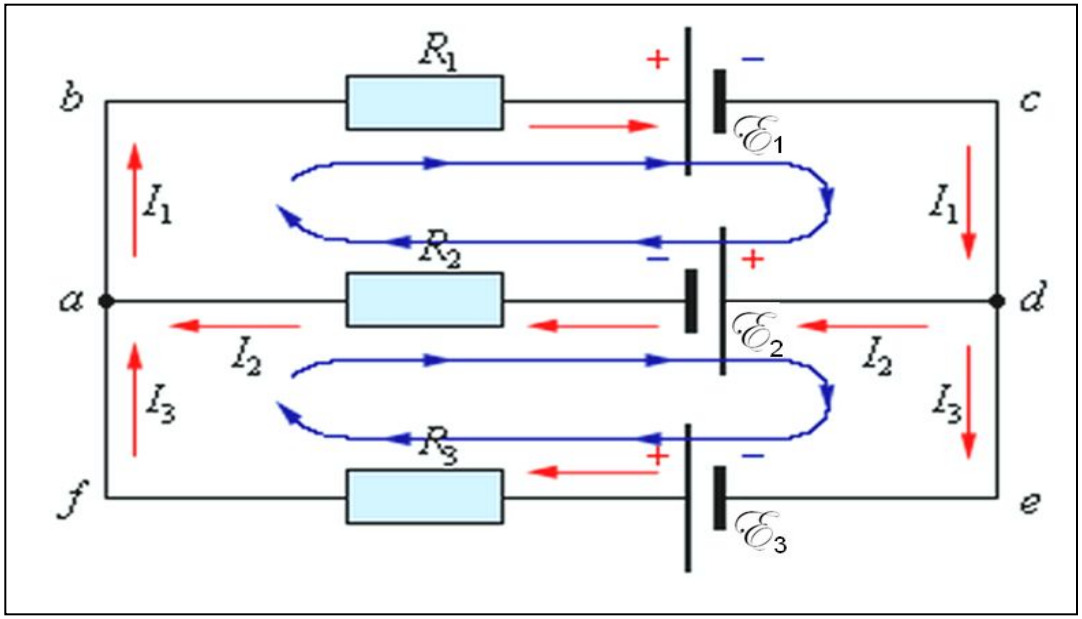
Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

- **Первое правило** Кирхгофа гласит, что *алгебраическая сумма токов в любом узле любой цепи равна нулю (значения вытекающих токов берутся с обратным знаком):*

$$\sum I_k = 0$$



$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

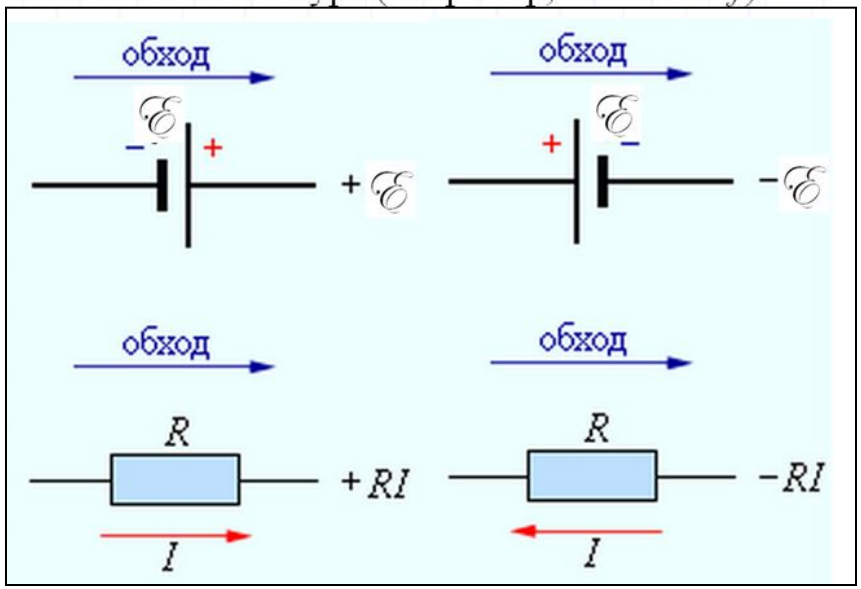


$$I_1R_1 + I_2R_2 = -\mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2,$$

$$-I_2R_2 + I_3R_3 = \mathscr{E}_2 + \mathscr{E}_3,$$

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Пример разветвленной электрической цепи. Цепь содержит один независимый узел (a или d) и два независимых контура (например, *abcd* и *adef*)



- Второе правило Кирхгофа можно сформулировать так: ***алгебраическая сумма произведений сопротивления каждого из участков любого замкнутого контура разветвленной цепи постоянного тока на силу тока на этом участке равна алгебраической сумме ЭДС вдоль этого контура***.

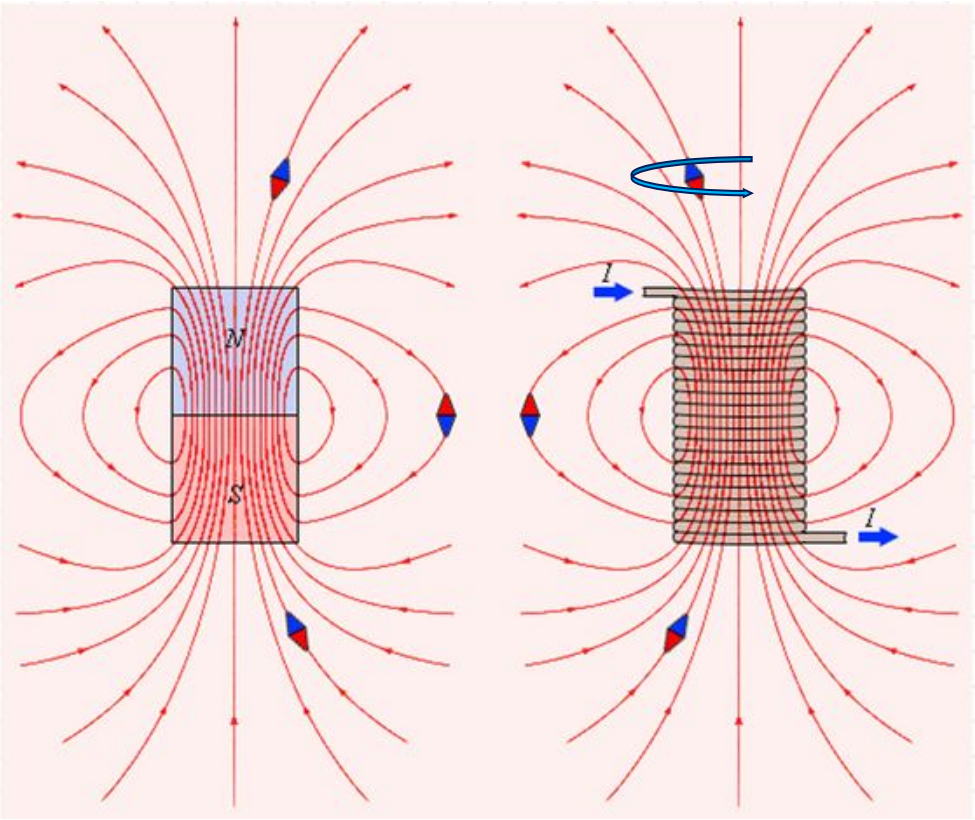
Магнитное поле и его характеристики

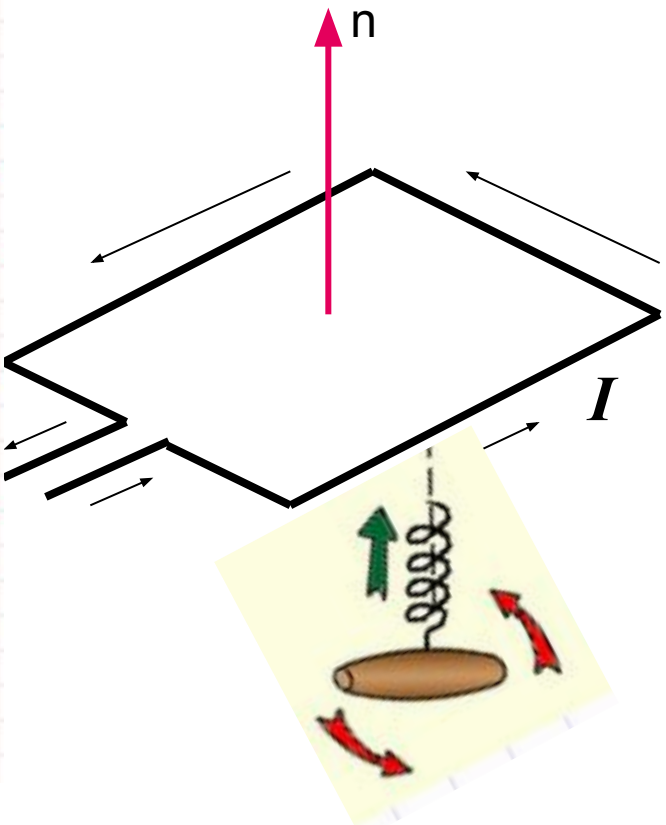
- ***Магнитное поле*** *– это поле окружающее токи и постоянные магниты и оказывающее силовое воздействие на проводники с током и на постоянные магниты.*
- *Важной особенностью магнитного поля является то, что оно действует, только на движущиеся в нем электрические заряды.*

Вектор магнитной индукции

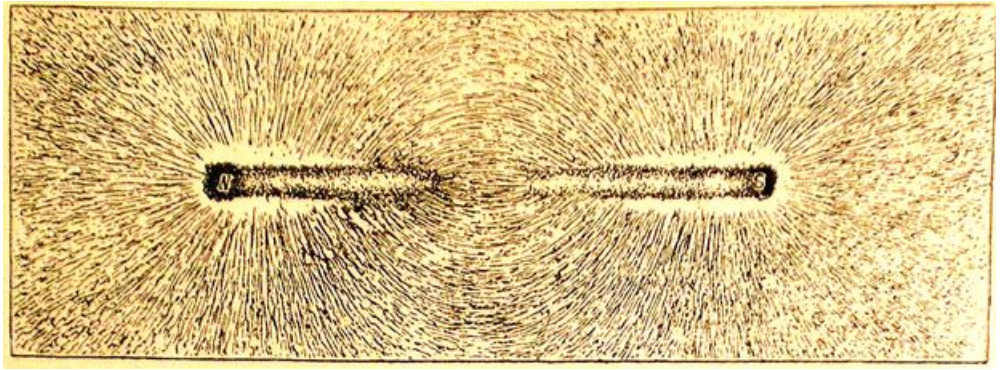
- Для описания магнитного поля необходимо ввести силовую характеристику поля, аналогичную вектору *напряженности* электрического поля. Такой характеристикой является ***вектор магнитной индукции B*** который определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле.

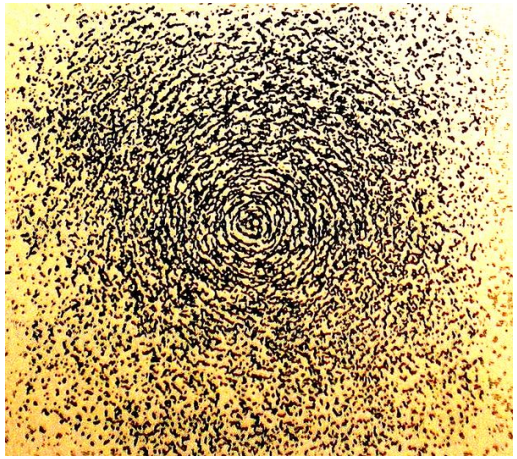
Определение направления вектора магнитной индукции





- Аналогично силовым линиям в электростатике можно построить ***линии магнитной индукции***, в каждой точке которых вектор ***B*** направлен по касательной.





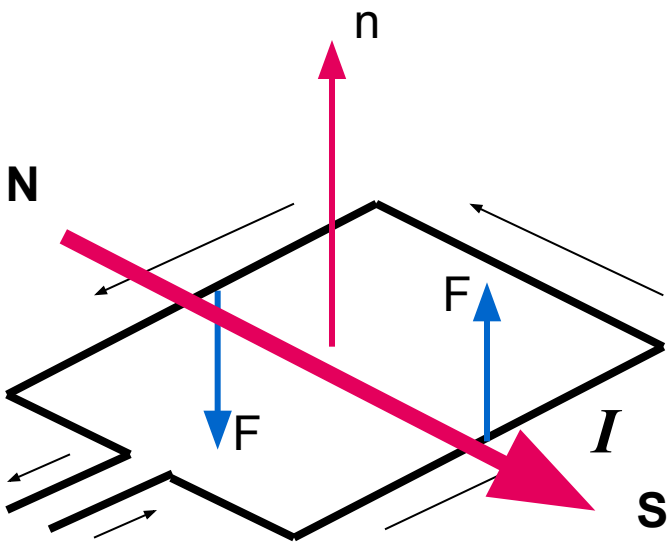
- *Линии магнитной индукции всегда замкнуты*, они нигде не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются ***вихревыми***.
- Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Единица измерения магнитной индукции

- Единица измерения B называемая *тесла* (Тл), равна магнитной индукции однородного поля, в котором на плоский контур с током, имеющий магнитный момент

1 А · м^2 действует максимальный вращающий момент, равный

1 Н · м.



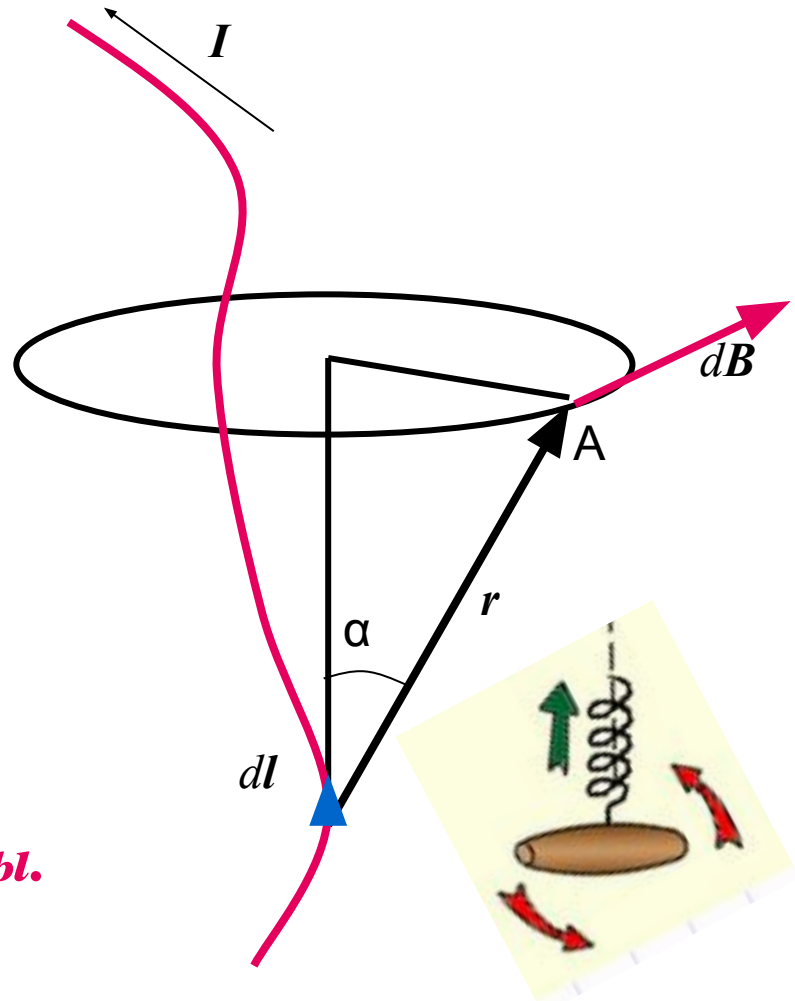
Закон Био – Савара - Лапласа

Элемент dl проводника с током $\boldsymbol{I}$ создает в некоторой точке A индукцию поля $d\boldsymbol{B}$, которая равна:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{I[d\vec{l},\vec{r}]}{r^3}$$

Модуль вектора $d\boldsymbol{B}$ определяется как:

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



μ_0 – ***магнитная постоянная***

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А^2 $= 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Единица индуктивности – ***генри*** (Гн)

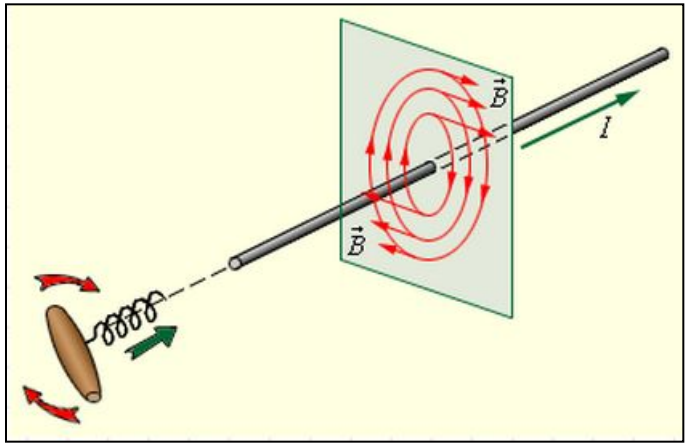
μ– ***магнитная проницаемость среды.***

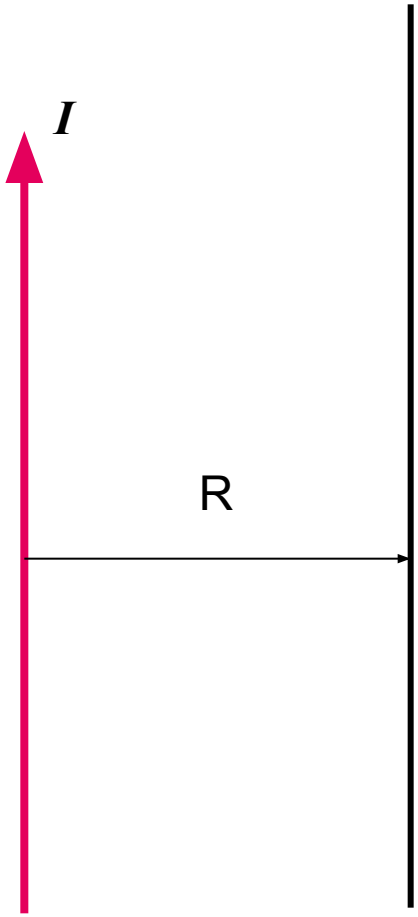
В вакууме $\boldsymbol{\mu = 1}$

Направление вектора $d\boldsymbol{B}$ определяется по правилу правого винта

- Индукция магнитного поля прямого тока I в точке на расстоянии R от этого тока определяется ***законом Био-Савара-Лапласа***:

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





Напряженность магнитного поля

- Векторную величину

$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{B}/\mu\mu_0$, характеризующую зависимость магнитного поля в некоторой точке от силы тока и положения этой точки, называют ***напряженностью магнитного поля***.

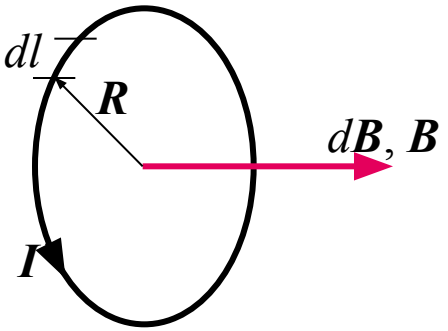
Принцип суперпозиции

- Вектор магнитной индукции результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равен векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током или зарядом в отдельности.

Вычисление поля, создаваемого током, текущим по тонкому круговому проводнику

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl$$

$$B = \int \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}$$

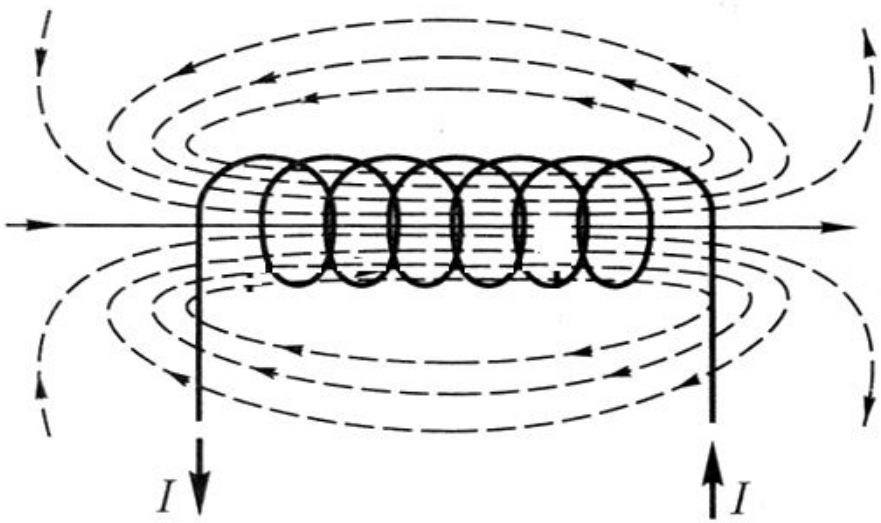


- Магнитное поле внутри соленоида

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$$

N – число витков

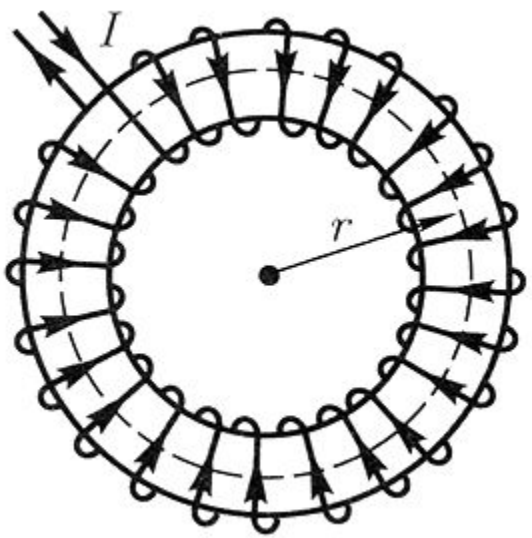
l – длина соленоида



- Магнитное поле внутри тороида

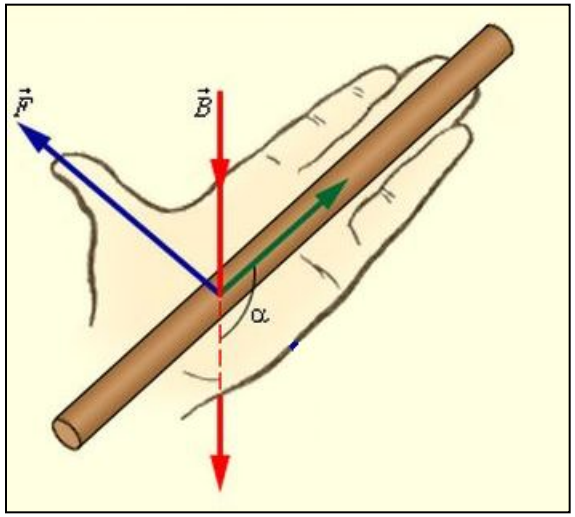
$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 N I$$

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



Поле вне тороида отсутствует

Закон Ампера.



- Движение в магнитном поле проводника (элемента длиной *dl*) с током определяется ***силой Ампера*:**

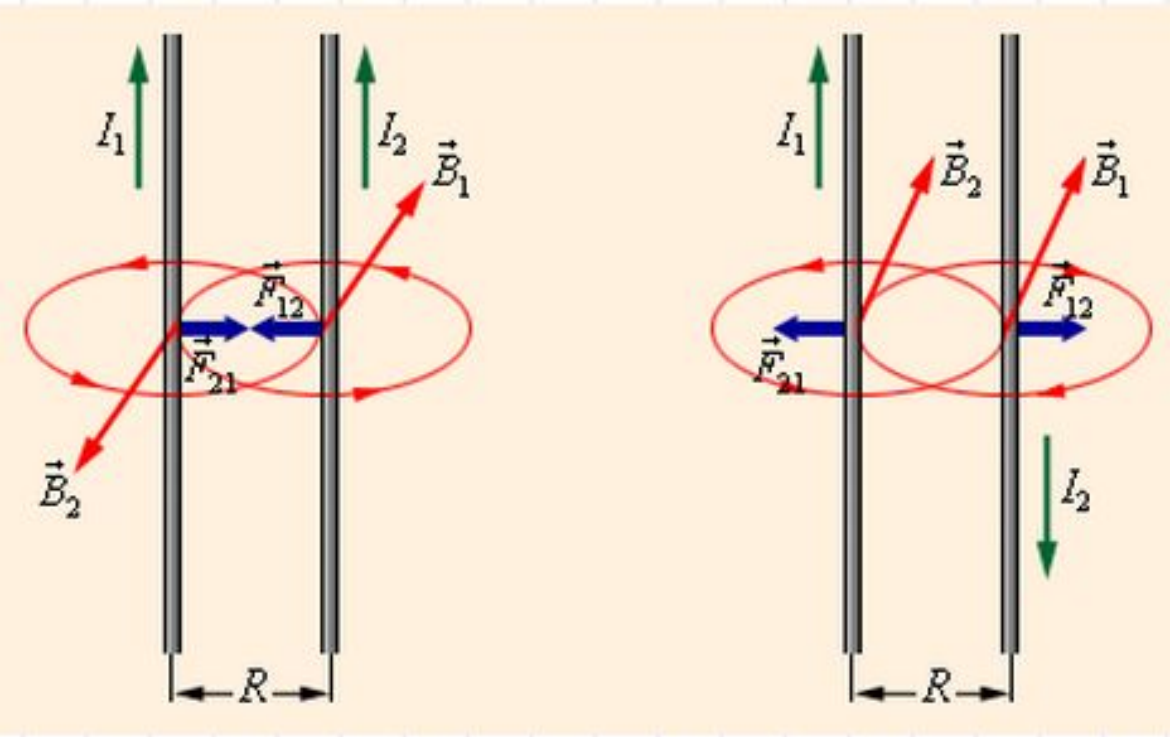
$$d\boldsymbol{F} = I[d\boldsymbol{l},\boldsymbol{B}].$$

Модуль силы вычисляется по формуле:

$$dF = IBdl \cdot sin\alpha$$

Для определения направления силы Ампера используют ***правило левой руки***: если расположить ее так, чтобы линии индукции ***B*** входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Взаимодействие параллельных токов



- $d\boldsymbol{F}_{21} = -\, d\boldsymbol{F}_{12}$

По модулю эти силы равны:

$$dF_{12} = dF_{21} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2 I_1 I_2}{R} dl$$

Вектор магнитного момента

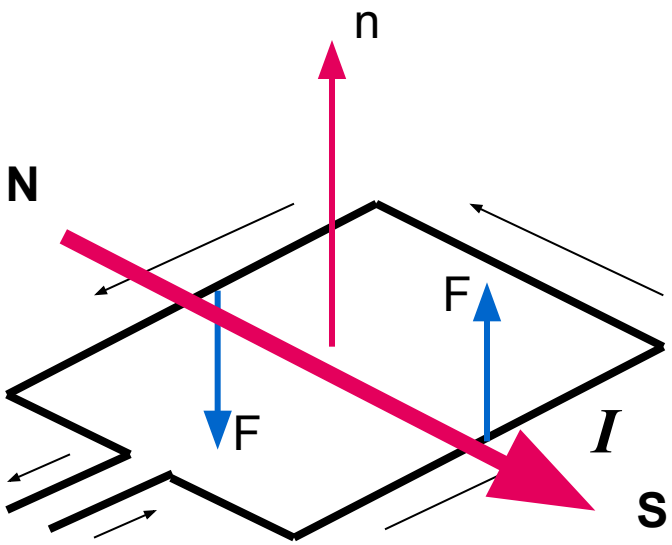
- Момент сил действующий на рамку с током в магнитном поле:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$$

где $\vec{p}_m$ ***вектор магнитного момента рамки*** с током; $\vec{B}$ - ***вектор магнитной индукции*** (количественная характеристика магнитного поля).

Для плоского контура с током I, с площадью поверхности S:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$



- Магнитный момент характеризует магнитные свойства контура с током. Поскольку $M/I = BS$, а B определяет плотность линий магнитной индукции, то произведение BS соответствует количеству линий, пронизывающих контур рамки, и всю совокупность линий называют *магнитным потоком* Ф сквозь этот контур. Выходящие линии считают со знаком «плюс», а входящие – «минус».

Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для поля $\boldsymbol{B}$

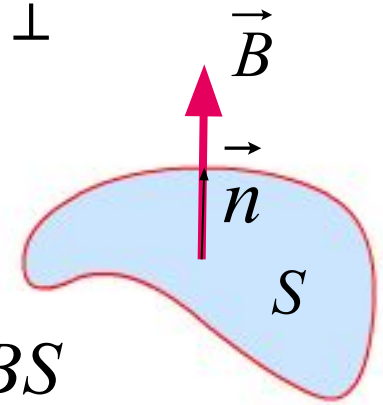
- ***Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком)*** через площадку dS называется *скалярная* физическая величина, равная

$$d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS = B\cos\alpha dS$$

Для произвольной поверхности S

$$\Phi_B = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S B_n dS$$

Если $\boldsymbol{B} \perp \boldsymbol{S}$



$$\Phi_B = BS$$

Единица магнитного потока

- *Единица магнитного потока* ***вебер*** (Вб)
  - 1 Вб магнитный поток, проходящий сквозь плоскую поверхность 1 м^2, расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл.

$$1\ \text{Вб} = 1\ \text{Тл} \cdot \text{м}^2$$

Теорема Гаусса для поля $\boldsymbol{B}$

- *Поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю:*

$$\oint_S B ds = \oint_S B_n ds = 0$$

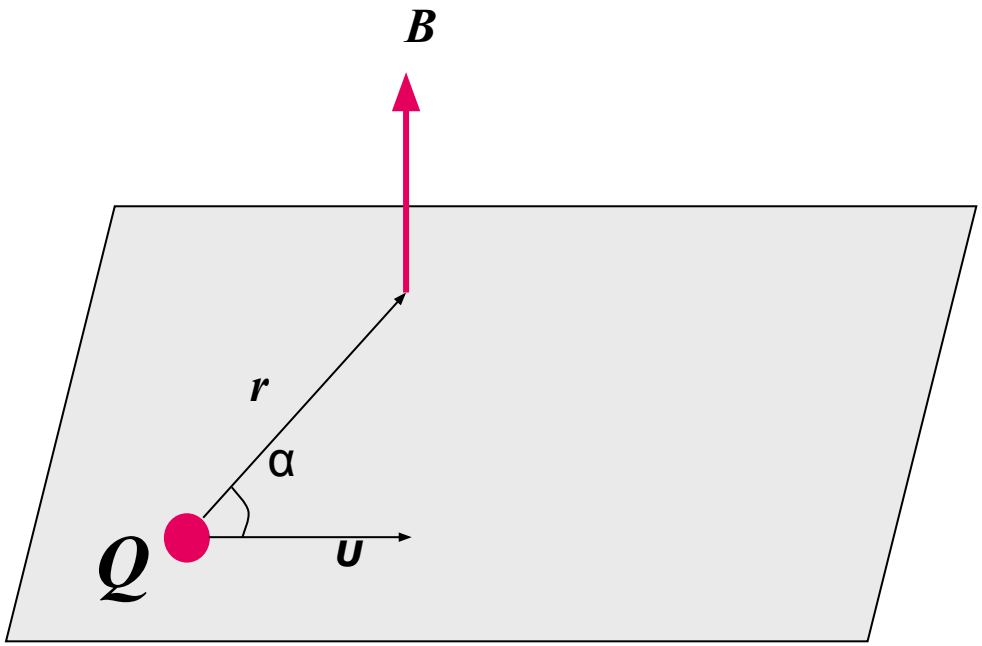
- *Эта теорема отражает отсутствие магнитных зарядов и то, что линии магнитной индукции являются замкнутыми (не имеют ни начала, ни конца.*

Магнитное поле движущегося заряда

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Q[\vec{\upsilon}\vec{r}]}{r^3}$$

По модулю:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Q}{r^2} \sin\alpha$$

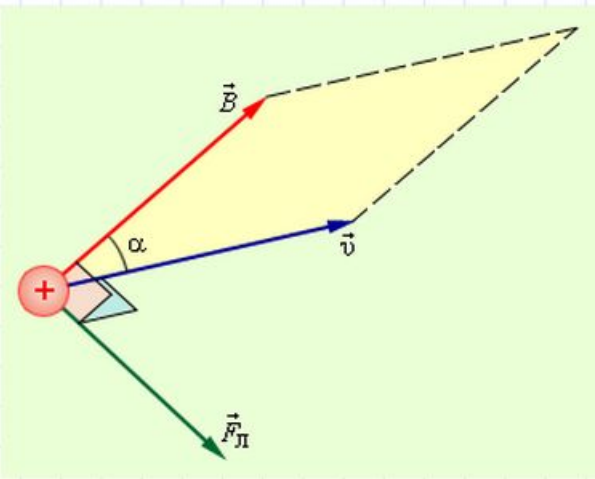


Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.

$$\vec{F} = Q[\vec{\upsilon}\vec{B}]$$

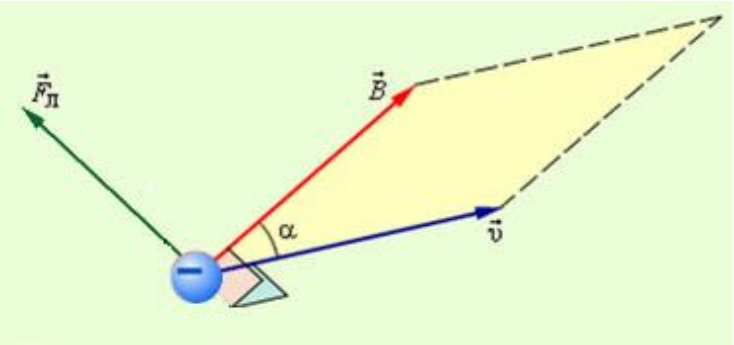
По модулю:

$$\vec{F} = Q\upsilon B \sin\alpha$$



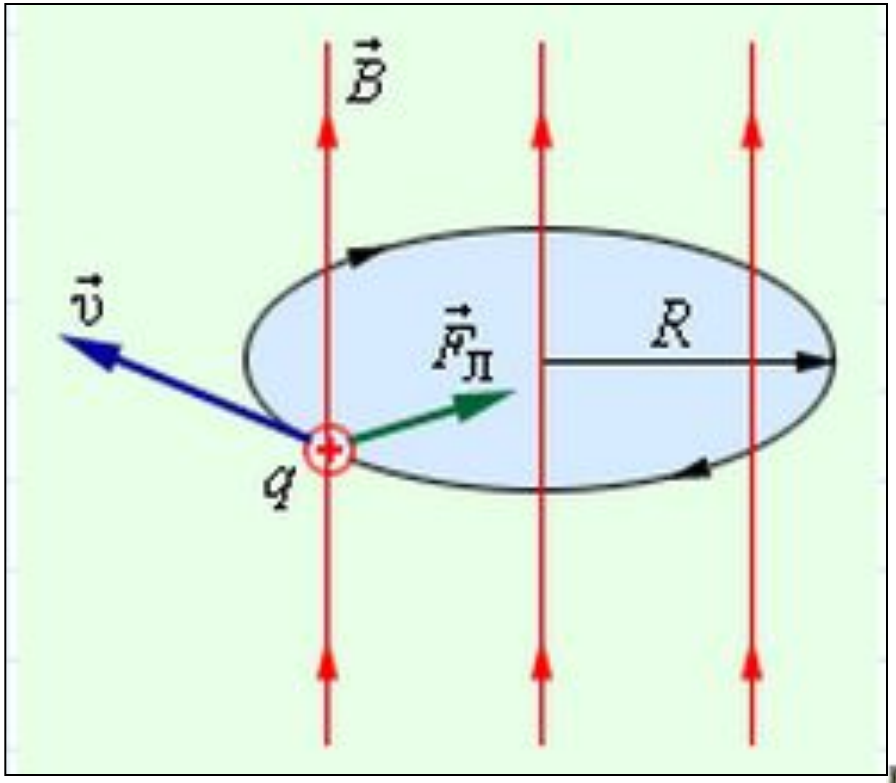
Если помимо магнитного поля на движущийся заряд действует электрическое поле ***E*** то

$$\vec{F} = Q\vec{E} + Q[\vec{\upsilon}\vec{B}]$$



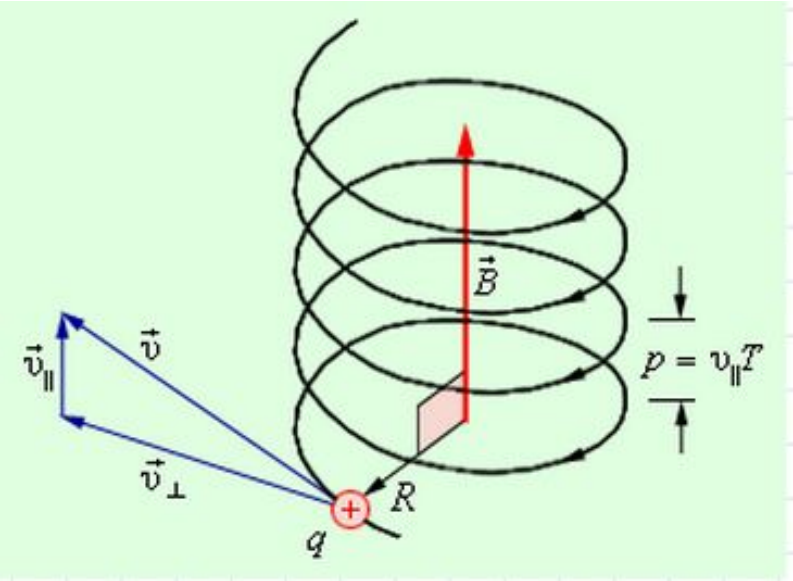
Сила Лоренца перпендикулярна скорости и поэтому работы не совершает.

- Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость ***υ*** лежит в плоскости, перпендикулярной вектору ***B*** то частица будет двигаться по окружности радиуса R



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

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

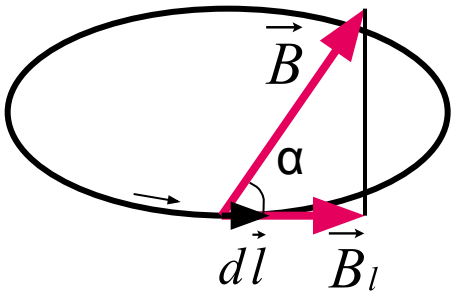


Если скорость ***u*** частицы имеет составляющую $\boldsymbol{u}_{||}$ вдоль направления магнитного поля, то такая частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали. При этом радиус спирали *R* зависит от модуля перпендикулярной магнитному полю составляющей $\boldsymbol{u}_{\perp}$ вектора ***u,*** а шаг спирали *p* – от модуля продольной составляющей $\boldsymbol{u}_{||}$.

Циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ магнитного поля в вакууме

- *Циркуляцией вектора* $\boldsymbol{B}$ по заданному замкнутому контуру называется интеграл

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \oint_l B_l dl = \oint_l B \cos\alpha dl,$$

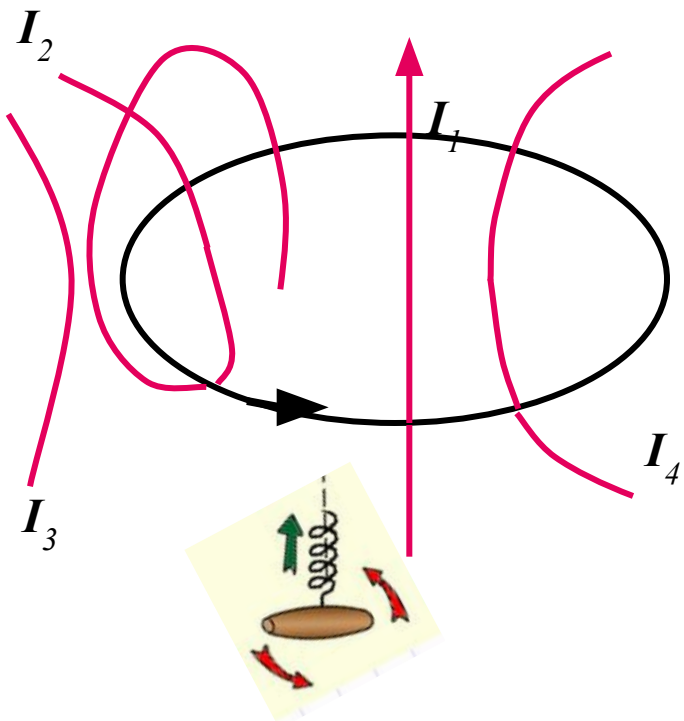


Теорема о циркуляции вектора *B*

- ***Закон полного тока для магнитного поля в вакууме:***
- ***Циркуляция вектора B по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром:***

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \oint_l B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^{n} I_k$$

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = I_1 + 2I_2 + 0 \cdot I_3 - I_4$$



- Если циркуляция вектора $\boldsymbol{E}$ электростатического поля равна 0, т. е электростатическое поле является ***потенциальным***, то циркуляция вектора $\boldsymbol{B}$ не равна 0 и такое поле называется ***вихревым.***