



Поле движущихся зарядов



Электричество и магнетизм
Постоянный электрический ток

Постоянный ток

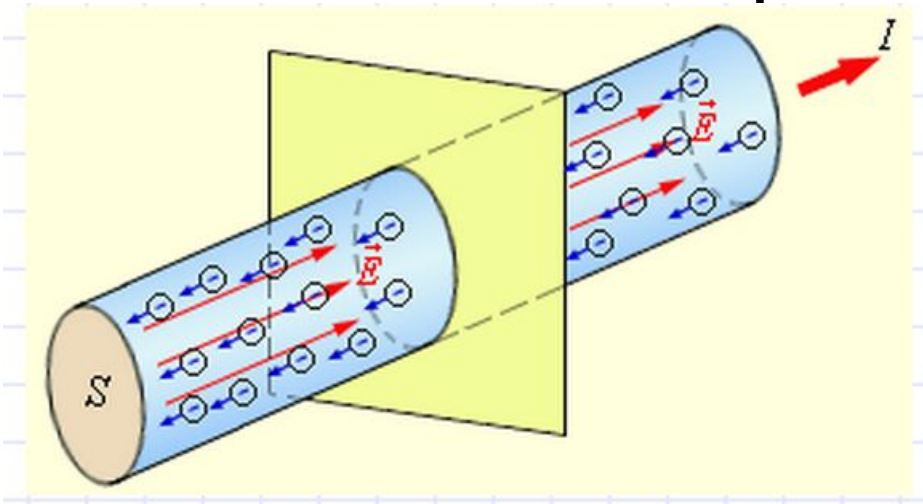
- **Электрический ток** - упорядоченное по направлению движение электрических зарядов. За направление тока принимается направление движения **положительных** зарядов.
- Для возникновения и существования электрического тока в проводнике необходимо создать в нем и поддерживать электрическое поле.

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:**

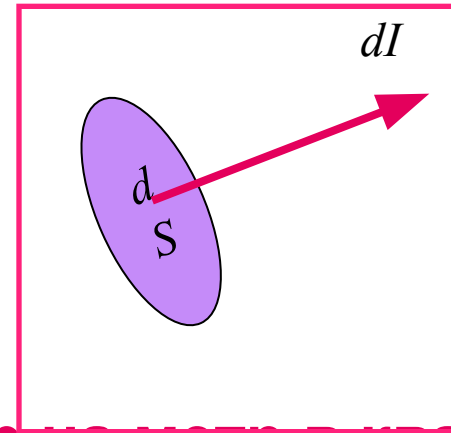
$$1\text{А} = 1\text{Кл}/1\text{с}.$$

Для постоянного тока: $I=q/t$.

Используется векторная величина – **плотность**

тока: $\mathbf{j} = I/S,$

где S – площадь поперечного сечения проводника.

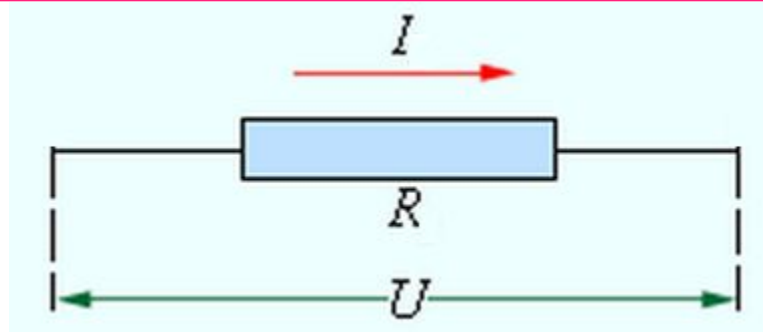


- Единица плотности тока – **ампер на метр в квадрате (А/м²)**

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

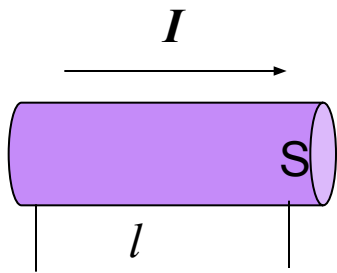
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}; \quad \text{или} \quad IR = U$$



■ **Напряжение измеряется в вольтах - (В)**

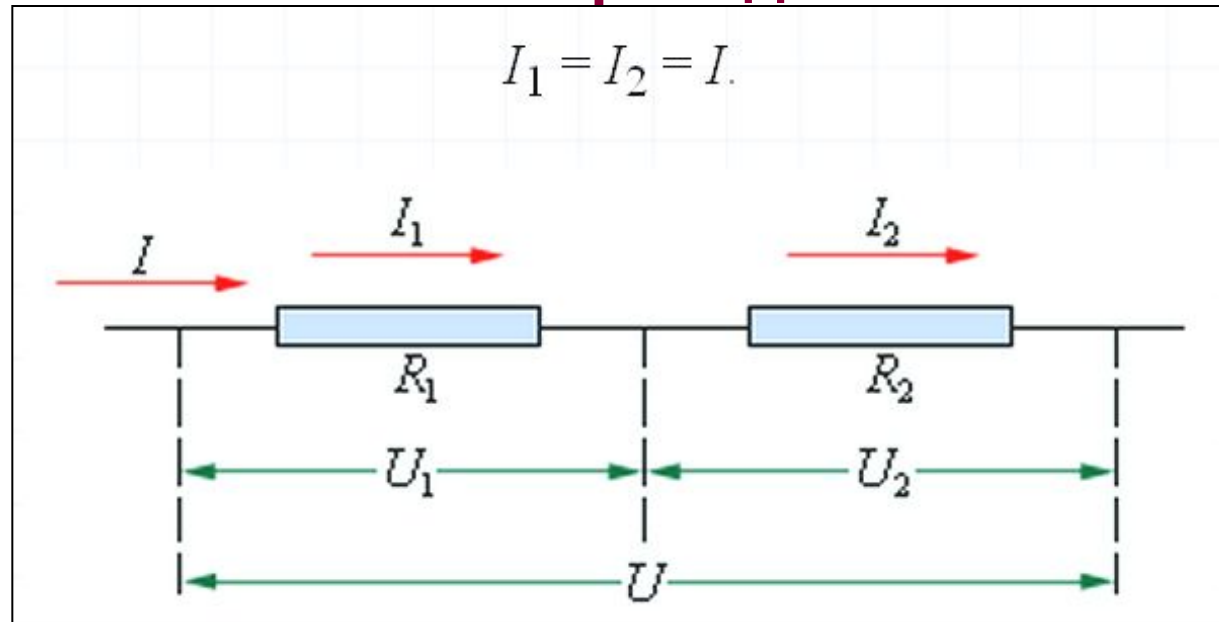
■ **Сопротивление проводника в Омах:**

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



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

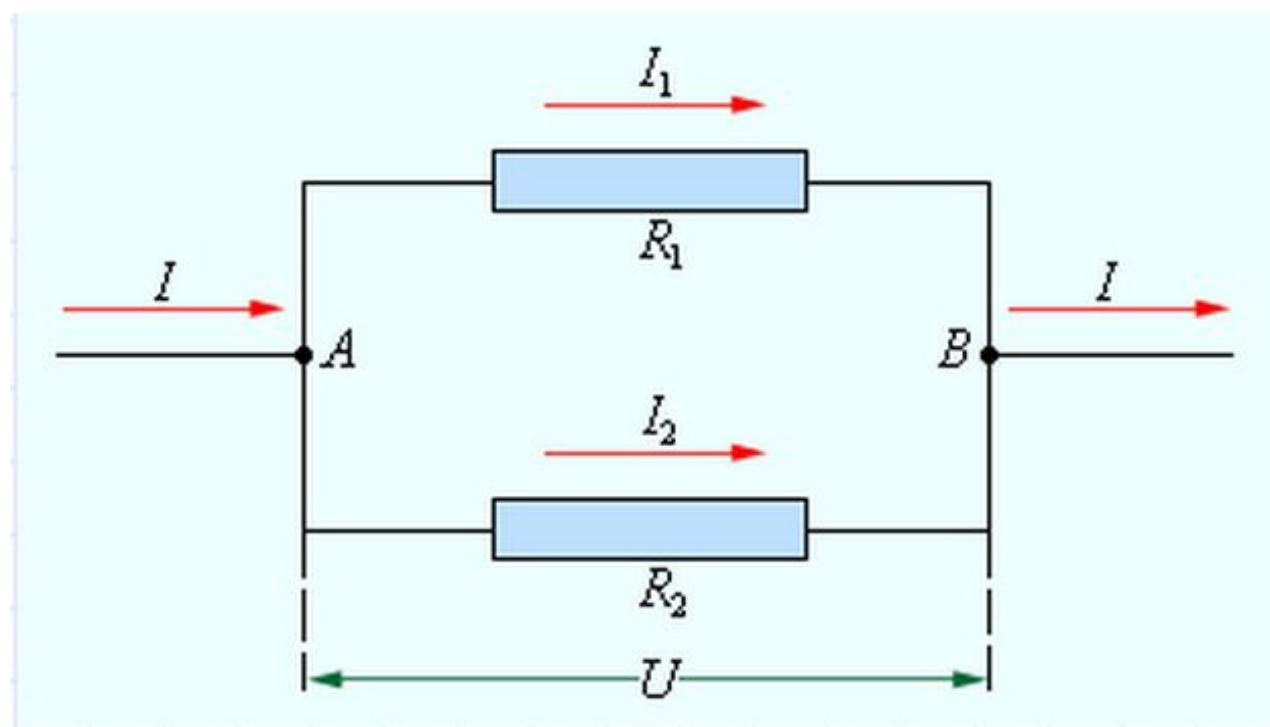
Последовательное и параллельное соединение проводников



Последовательное соединение проводников

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

$$R = R_1 + R_2.$$

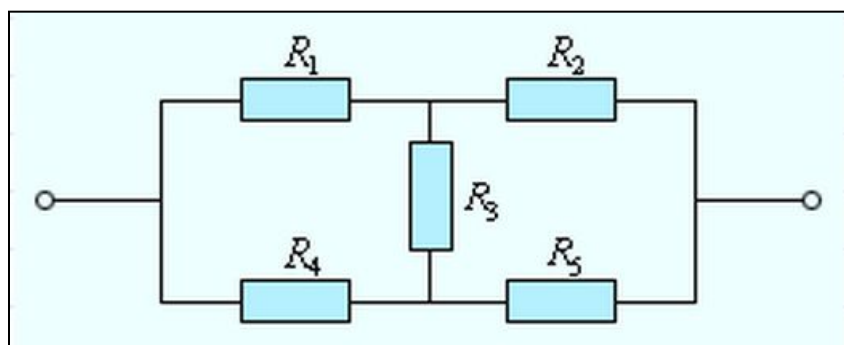
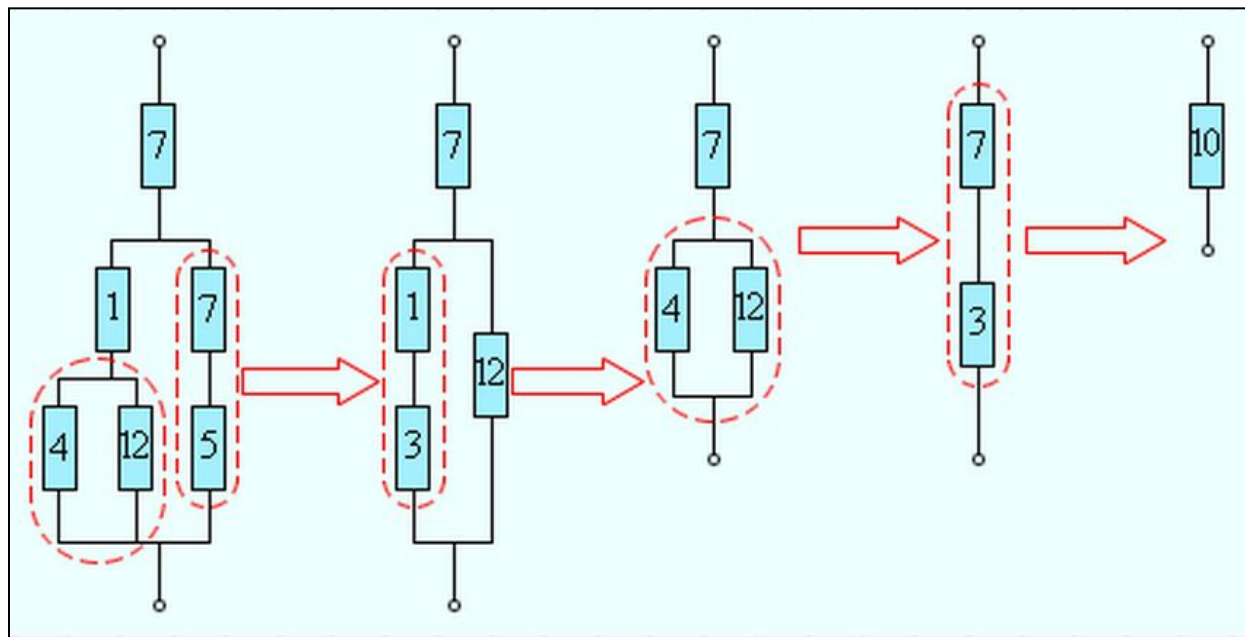


Параллельное соединение проводников

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

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

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:

$$A = IUt = I^2 R t = U^2 t / R.$$

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

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

$$N = A/t = IU = I^2 R = U^2 / R.$$

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

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

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

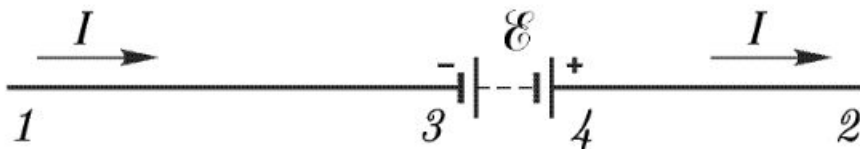
Сторонние силы.

- 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**.

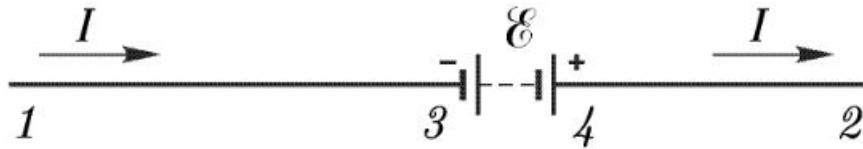
ЭДС

- 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 \mathcal{E} действующей на данном участке.

Полная работа на неоднородном участке
равна:

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

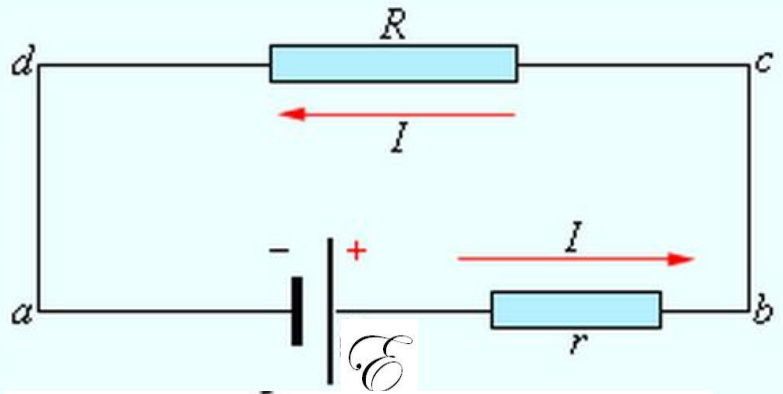
Величину U_{12} принято называть **падением напряжения** или просто **напряжением** на участке цепи 1–2

Для однородного участка напряжение равно разности потенциалов:

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

Закона Ома для неоднородной цепи или обобщенный закон Ома

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



Цепь постоянного тока

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

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

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

Но $\Delta\varphi_{cd} = \Delta\varphi_{ba} = -\Delta\varphi_{ab}$. Поэтому:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$



- *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

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

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

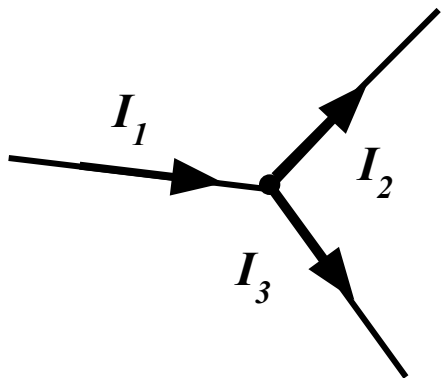
$\sum R$ сумма всех сопротивлений участка цепи

Закон Ома для замкнутой цепи

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

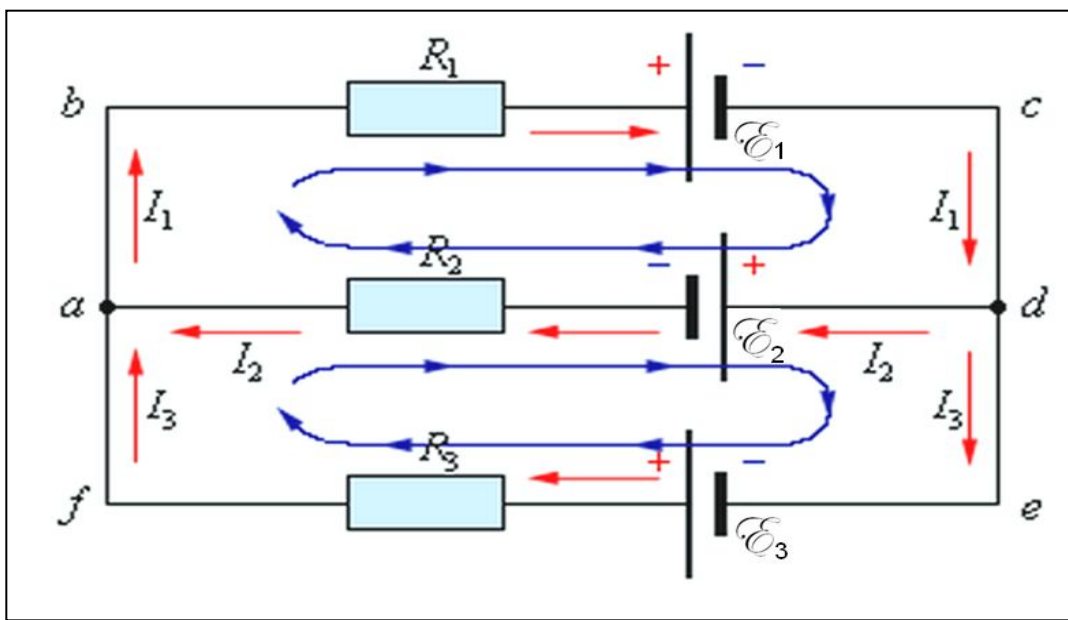
Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

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



$$\sum I_k = 0$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

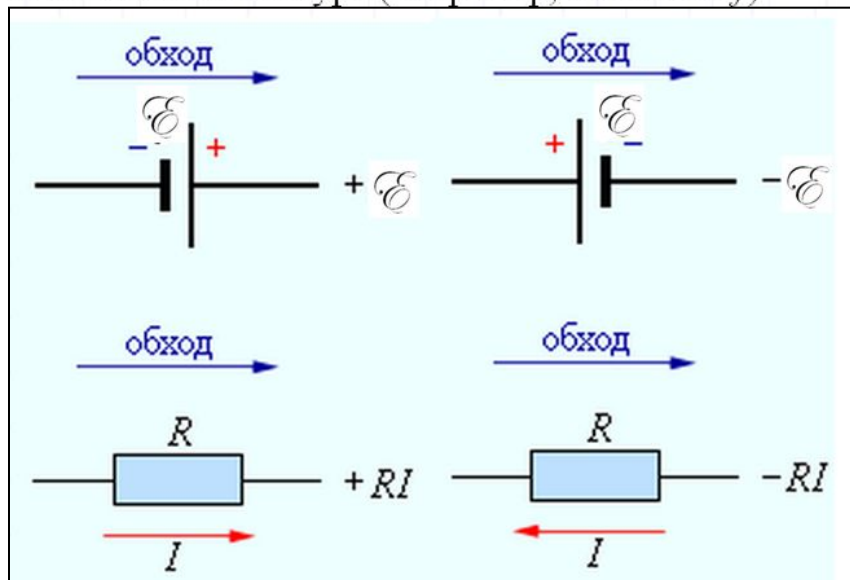


$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2,$$

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3,$$

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

Пример разветвленной электрической цепи. Цепь содержит один независимый узел (а 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.**

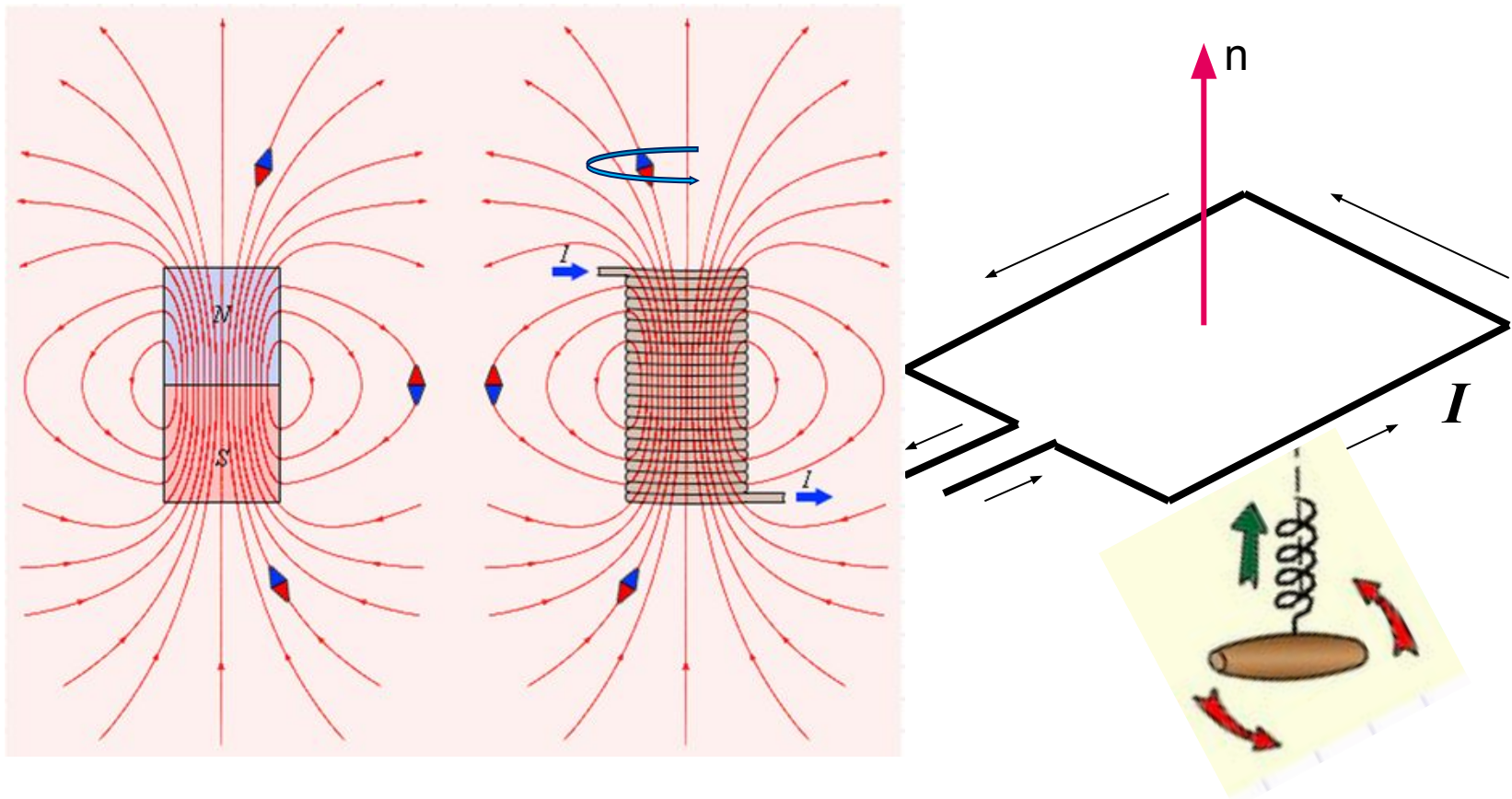
Магнитное поле и его характеристики

- **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.

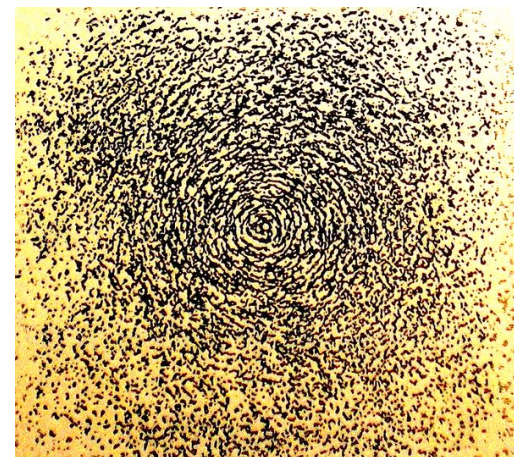
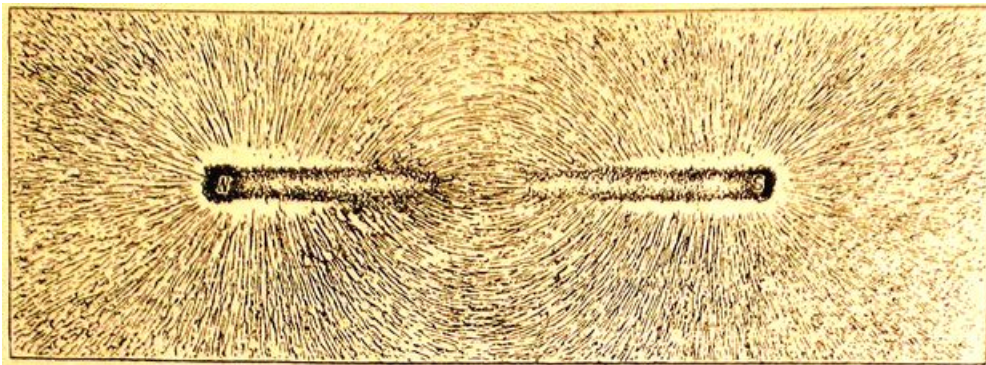
Вектор магнитной индукции

- 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



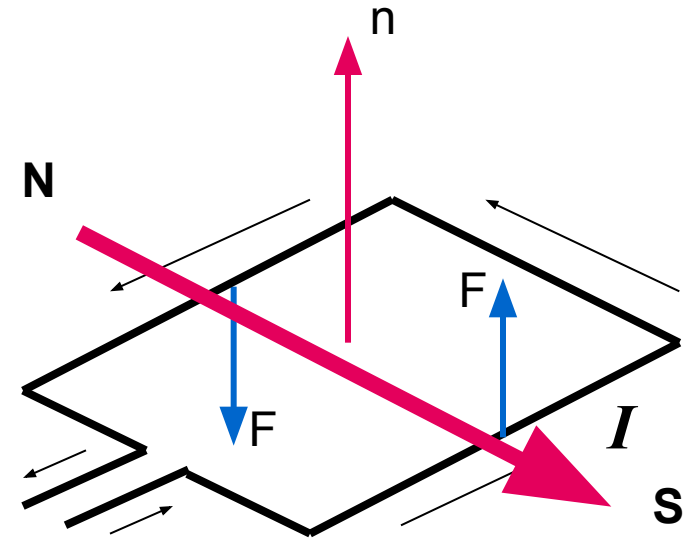
- Аналогично силовым линиям в электростатике можно построить **линии магнитной индукции**, в каждой точке которых вектор B направлен по касательной.



- *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 $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ действует максимальный вращающий момент, равный $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.



Закон Био – Савара - Лапласа

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

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

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

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

μ_0 – **магнитная постоянная**

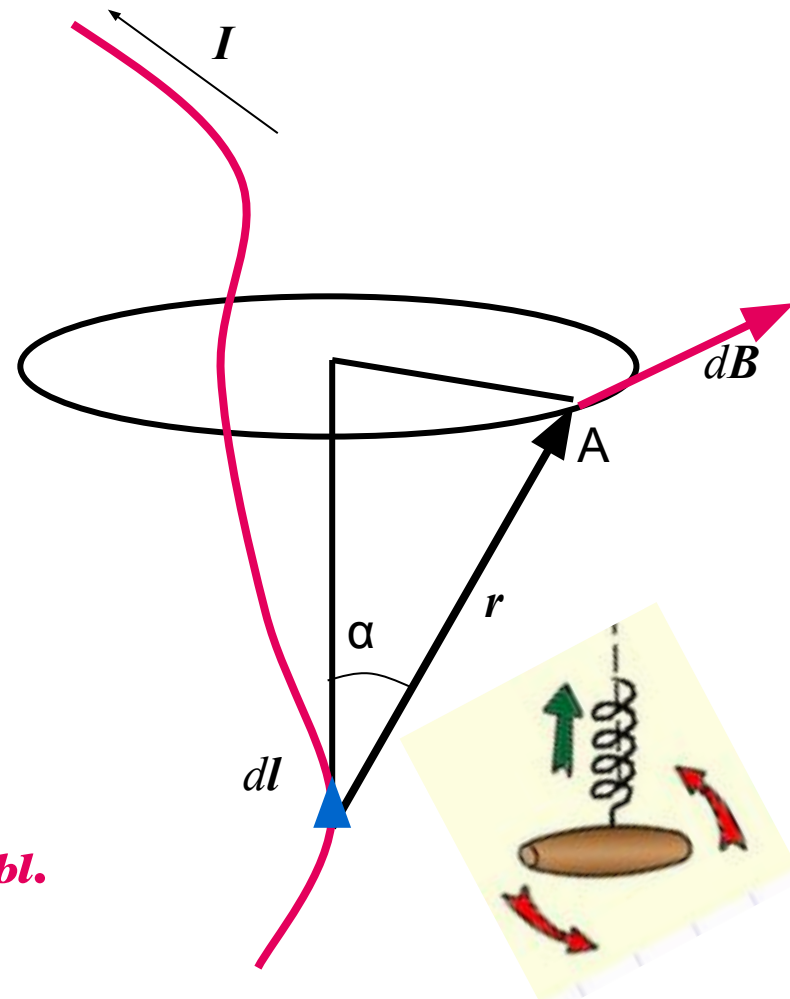
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Единица индуктивности – **генри** (Гн)

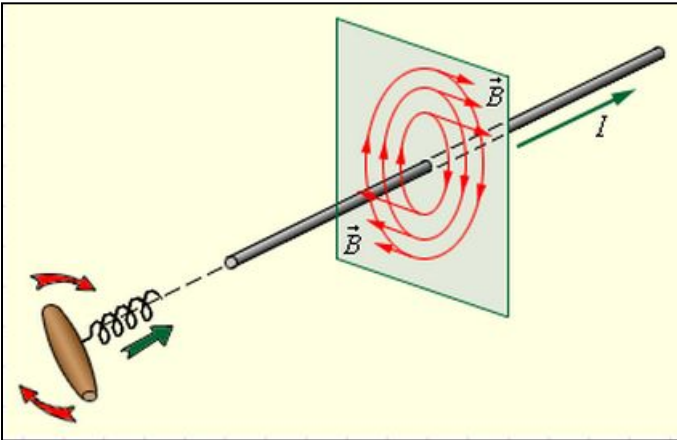
μ – **магнитная проницаемость среды.**

В вакууме $\mu = 1$

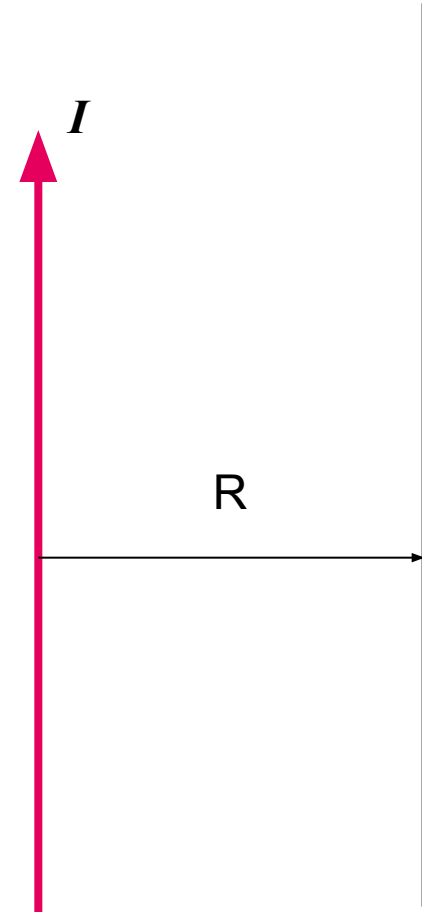
Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по правилу правого винта



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

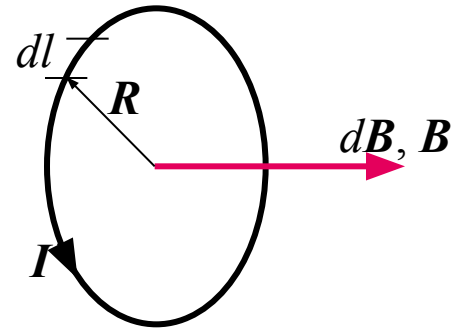
Принцип суперпозиции

- 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

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

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

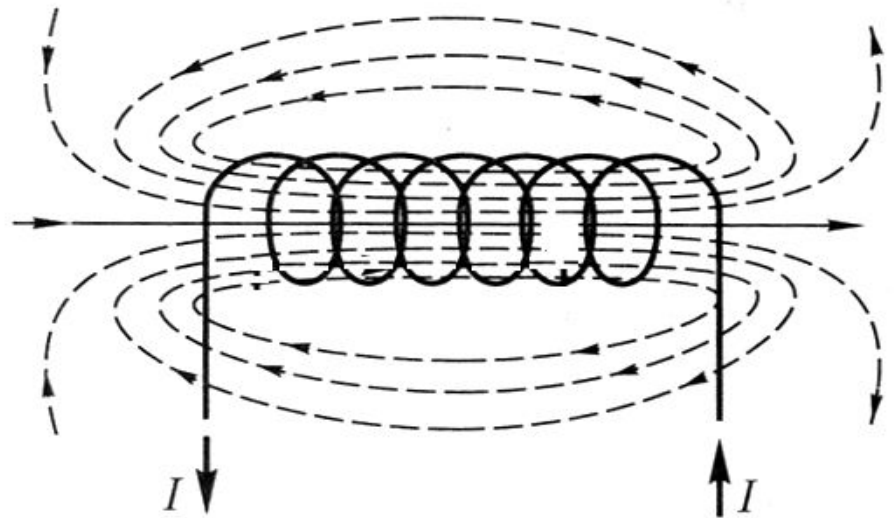


- Магнитное поле внутри соленооида

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

N – число витков

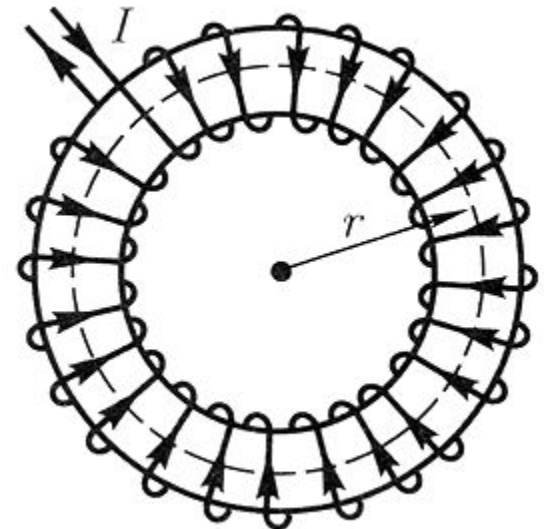
l – длина соленооида



- Магнитное поле внутри тороида

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$



Поле вне тороида отсутствует

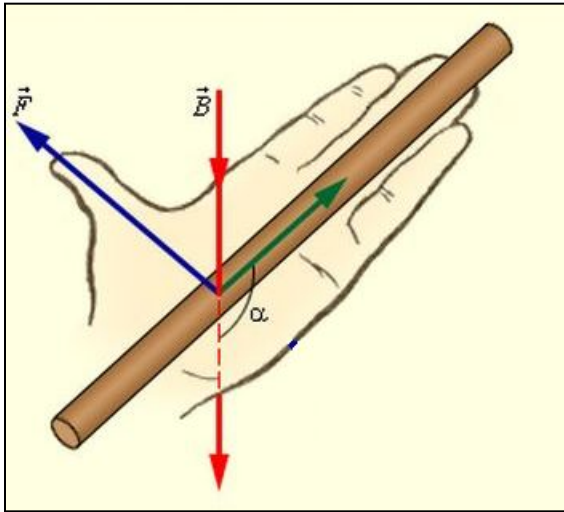
Закон Ампера.

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

$$dF = I[dl, B].$$

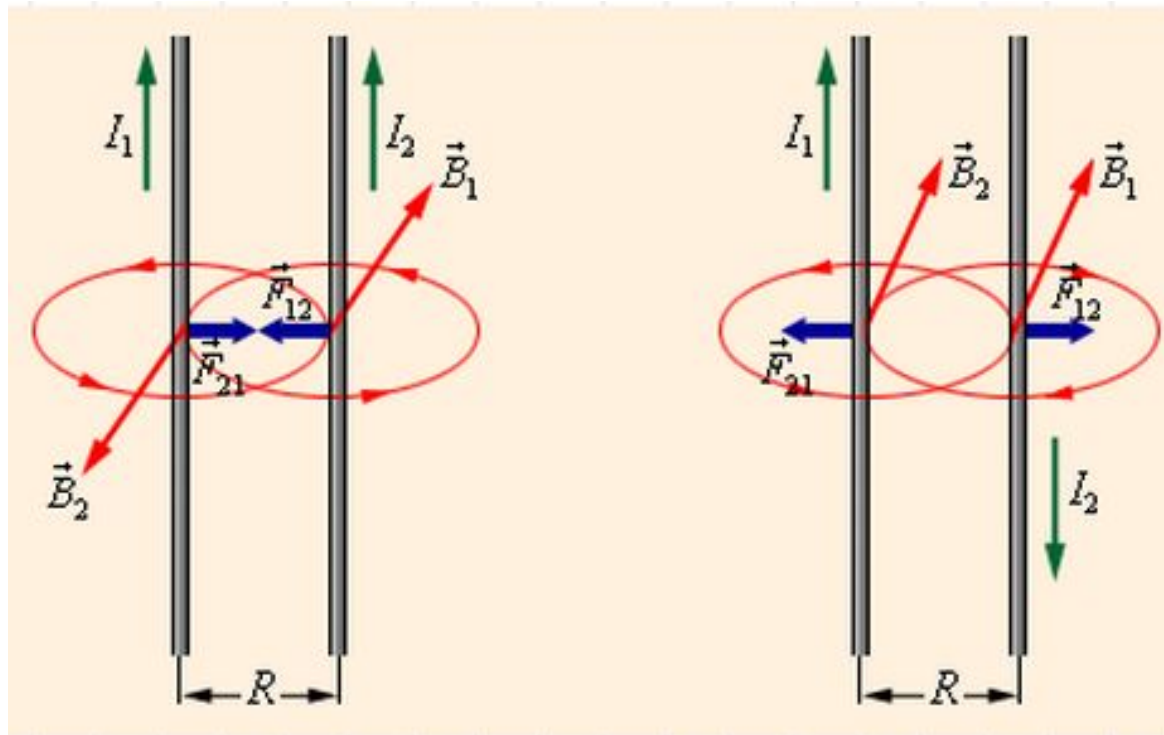
Модуль силы вычисляется по формуле:

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



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



- $dF_{21} = -dF_{12}$

По модулю эти силы
равны:

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

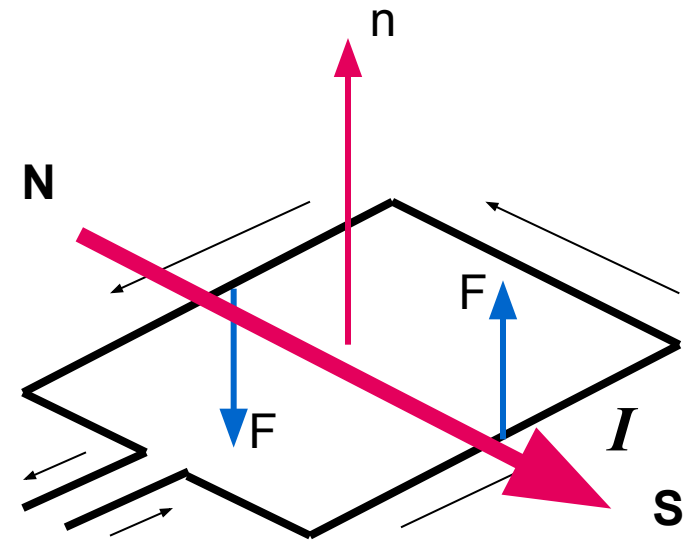
Вектор магнитного момента

- 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 Φ сквозь этот контур. Выходящие линии считают со знаком «плюс», а входящие – «минус».

Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для поля B

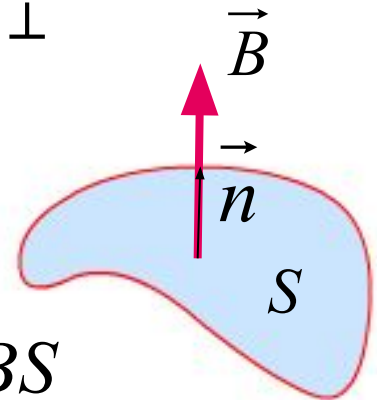
- **Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком)** через площадку dS называется **скалярная** физическая величина, равная

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

Для произвольной поверхности S

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

Если $B \perp S$



$$\Phi_B = BS$$

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 B

- Поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю:

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

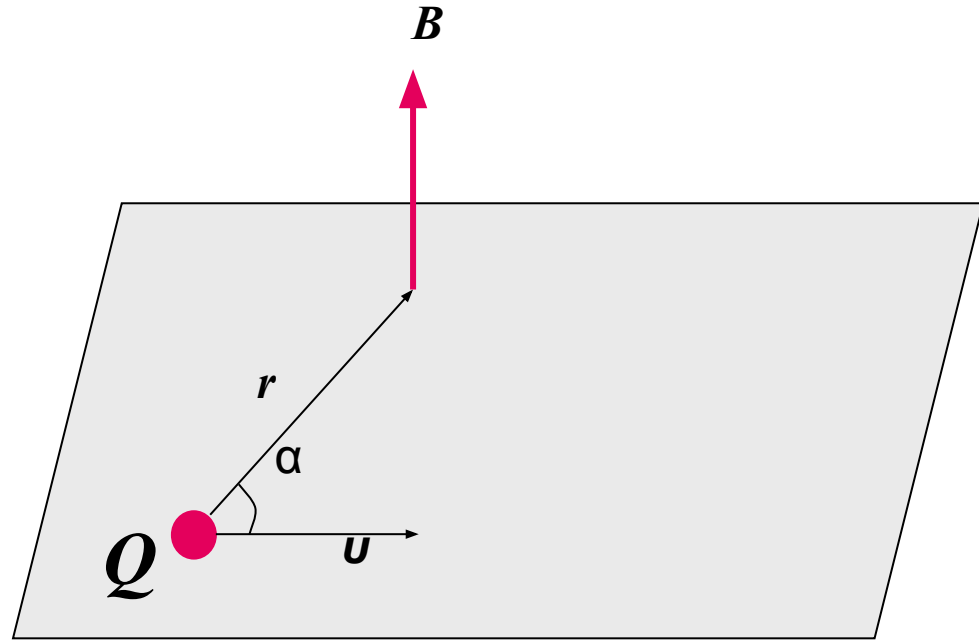
- Эта теорема отражает отсутствие магнитных зарядов и то, что линии магнитной индукции являются замкнутыми (не имеют ни начала, ни конца).

Магнитное поле движущегося заряда

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

По модулю:

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



Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.

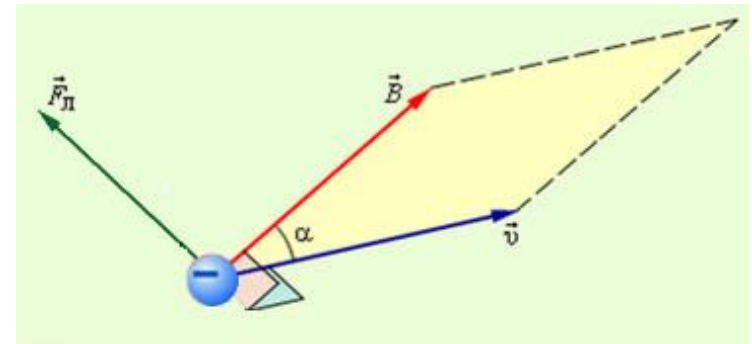
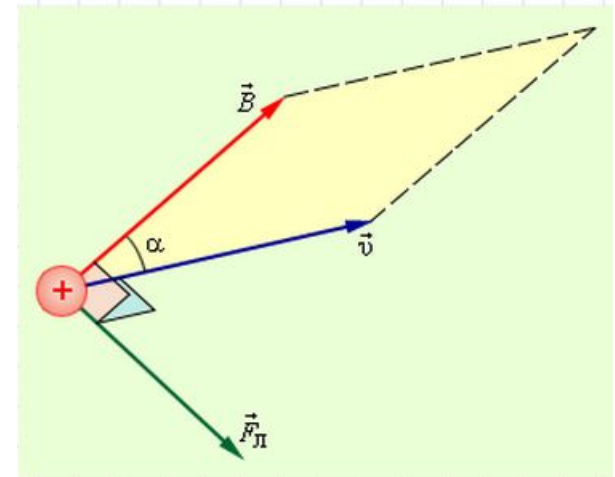
$$\vec{F} = Q[\vec{v}\vec{B}]$$

По модулю:

$$F = QvB \sin \alpha$$

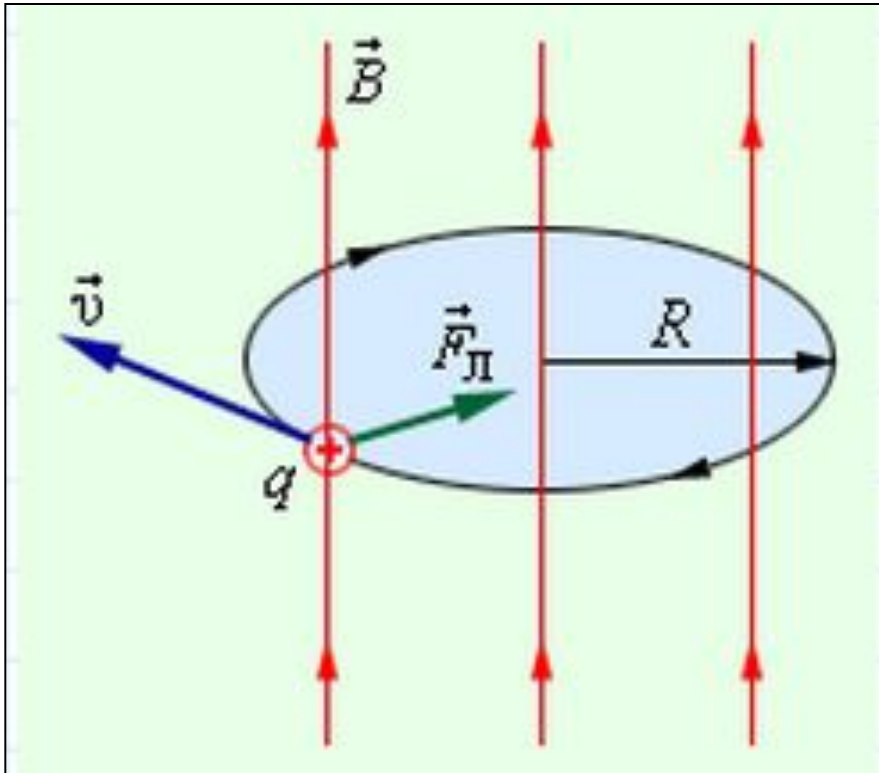
Если помимо магнитного поля на движущийся заряд действует электрическое поле E то

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



Сила Лоренца перпендикулярна скорости и поэтому работы не совершает.

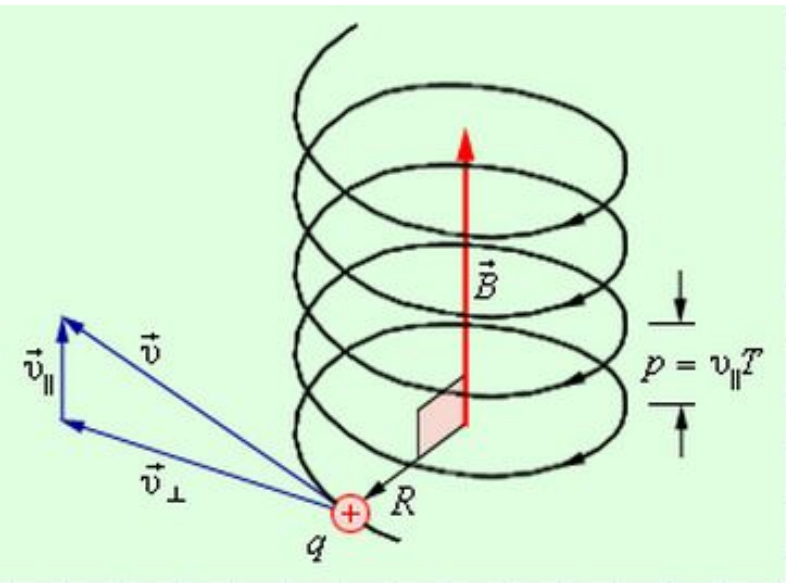
- Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость \mathbf{u} лежит в плоскости, перпендикулярной вектору \mathbf{B} то частица будет двигаться по окружности радиуса R



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

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

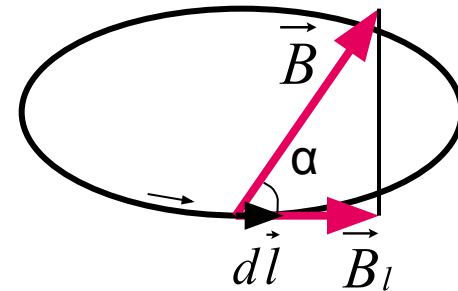
Если скорость \mathbf{u} частицы имеет составляющую \mathbf{u}_{\parallel} вдоль направления магнитного поля, то такая частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали. При этом радиус спирали R зависит от модуля перпендикулярной магнитному полю составляющей \mathbf{u}_{\perp} вектора \mathbf{u}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



Циркуляция вектора \vec{B} магнитного поля в вакууме

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

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

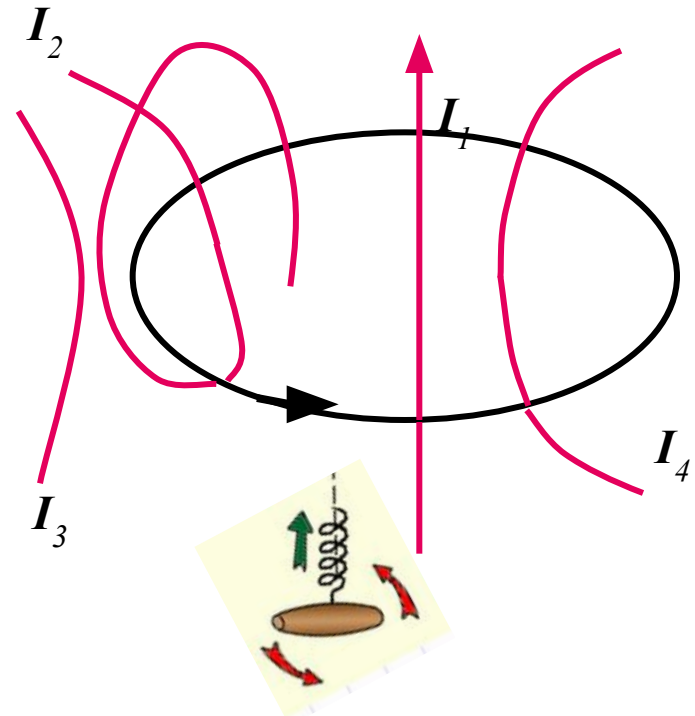


Теорема о циркуляции вектора \vec{B}

- **Закон полного тока для магнитного поля в вакууме:**
- **Циркуляция вектора \vec{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 E электростатического поля равна 0 , т. е. электростатическое поле является **потенциальным**, то циркуляция вектора B не равна 0 и такое поле называется **вихревым**.

