

# Магнитное поле тока

## ПЛАН

1. **Магнитное поле и его характеристики**
2. **Закон Био — Савара — Лапласа**
3. **Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов**
4. **Единицы измерения магнитных величин.**
5. **Сила Лоренца.**
6. **Циркуляция и поток вектора  $\mathbf{B}$  для магнитного поля в вакууме. Теорема Гаусса для поля**
7. **Магнитное поле соленоида и тороида.**
8. **Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле**
9. **Эффект Холла.**

# 1. Магнитное поле и его характеристики

1820 г.

Х. Эрстед. На магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся повернуть стрелку.

А. Ампер. Силовое взаимодействие двух проводников с токами. Закон взаимодействия токов.

В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**.

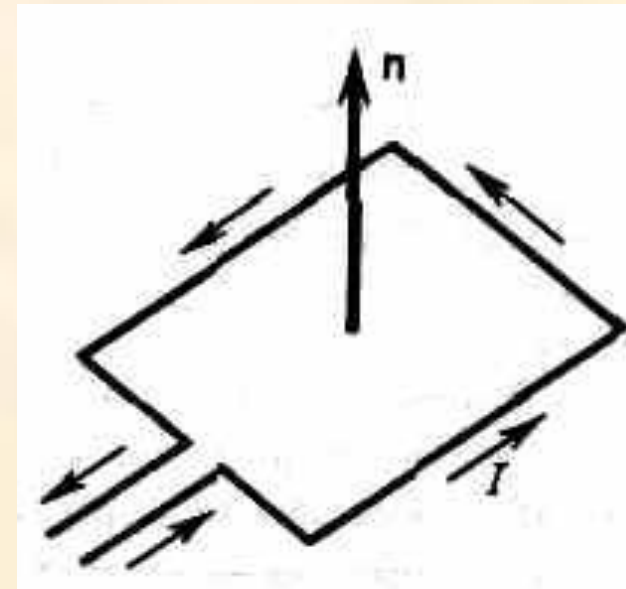
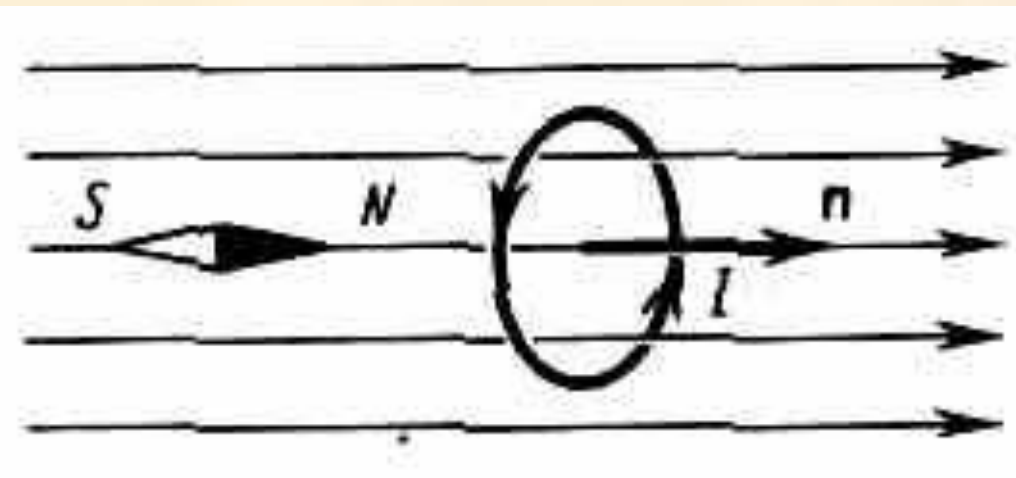
Магнитное поле действует **только на движущиеся** в этом поле электрические заряды

При исследовании магнитного поля используют **замкнутый плоский контур с током (рамка с током)**

За направление магнитного поля в данной точке принимается

- направление, вдоль которого располагается **положительная нормаль к рамке**
- направление, совпадающее с направлением силы, которая действует на **северный полюс** магнитной стрелки, помещенной в данную точку.

В качестве положительного направления нормали принимается направление, связанное с током **правилом правого винта**



- Рамка с током поворачивается в магнитном поле.
- Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}], \quad M = P_m B \sin \alpha$$

- $\vec{B}$  - вектор магнитной индукции,
- $\vec{P}_m$  - вектор магнитного момента рамки с током.
- Для плоского контура с током  $I$

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}, \quad P_m = IS$$

- $S$  - площадь поверхности контура (рамки),
- $\vec{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности рамки.

Направление  $\vec{P}_m$  совпадает с направлением положительной нормали.

Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

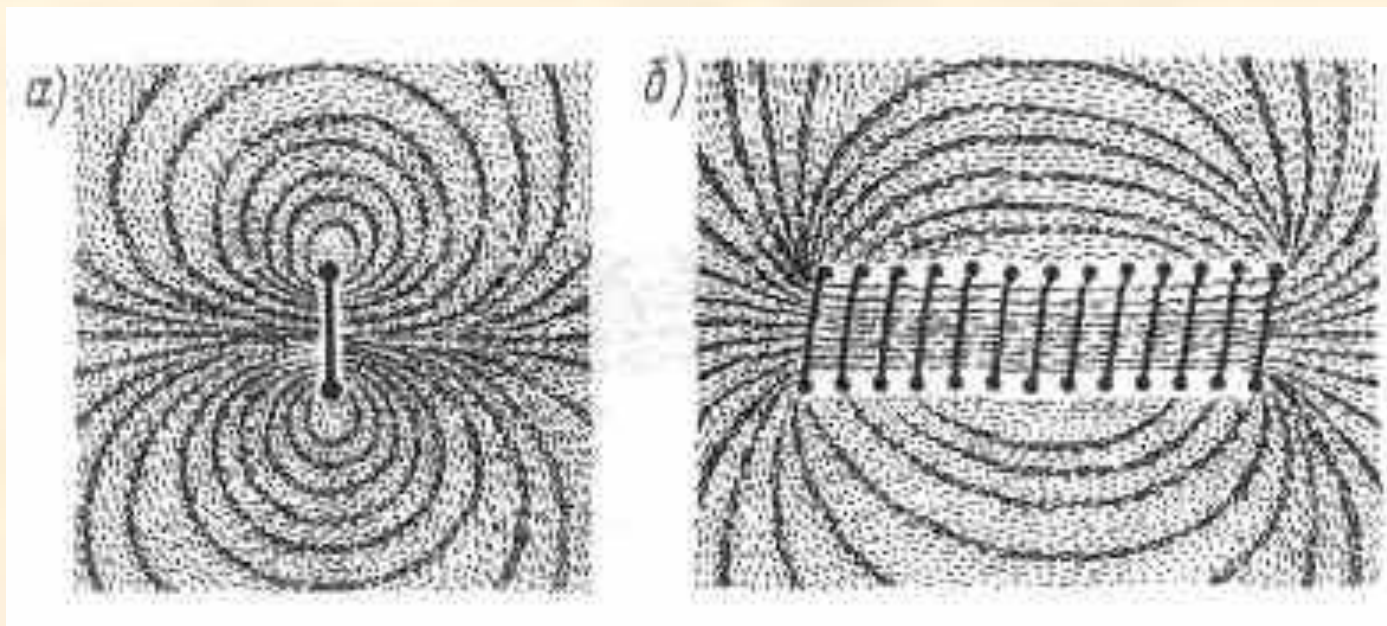
Вектор магнитной индукции  $B$  может быть выведен также из закона Ампера и из выражения для силы Лоренца.

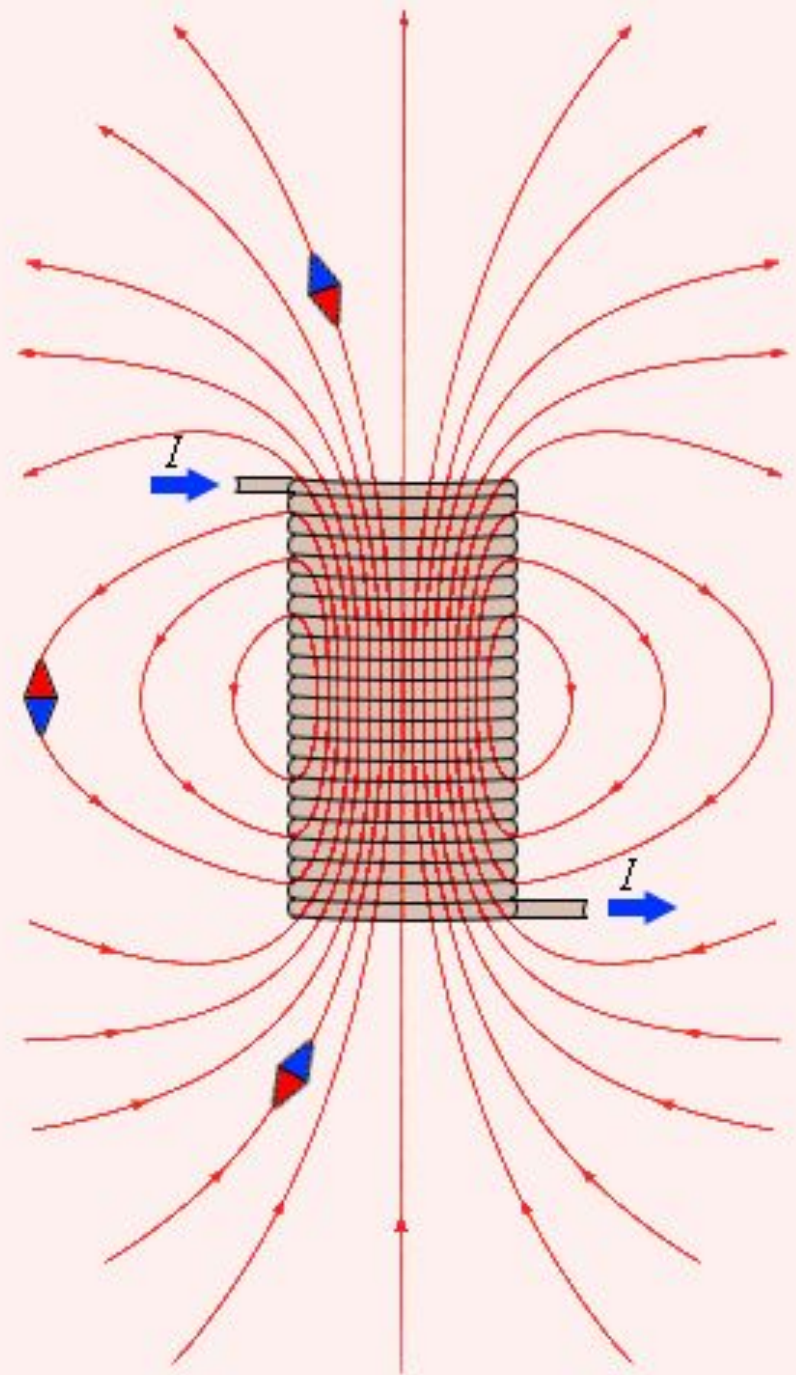
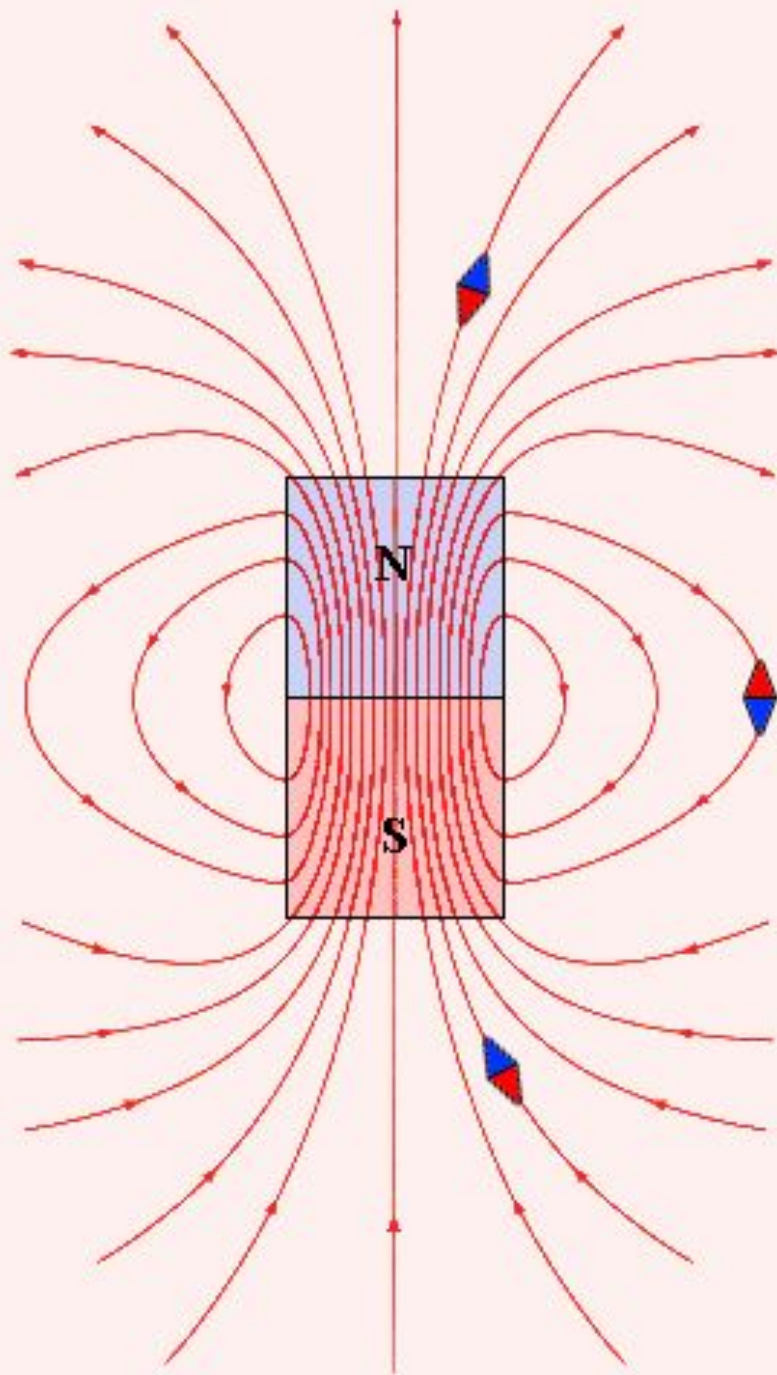
Магнитное поле изображают с помощью **линий магнитной индукции** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $B$ .

Их направление задается правилом **правого винта**.

Линии магнитной индукции всегда **замкнуты** и охватывают проводники с током.

Магнитное поле **не имеет источников** — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются **вихревыми**.





- Гипотеза А. Ампера: в любом теле существуют микроскопические токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.
  - Молекулярные токи создают свое магнитное поле и могут поворачиваться в магнитных полях макротоков.
  - Вектор магнитной индукции  $B$  характеризует **резльтирующее** магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками
  - Магнитное поле **макротоков** описывается вектором напряженности  $H$ .
  - Для однородной изотропной среды:  $B = \mu_0 \mu H$ ,
- $\mu_0$  — магнитная постоянная
- $\mu$  — магнитная проницаемость среды, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков  $H$  усиливается за счет поля микротоков среды.



## 2. Закон Био — Савара — Лапласа

Магнитное поле постоянных токов различной формы изучалось французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром.

Результаты этих опытов были обобщены французским математиком и физиком П. Лапласом.

Принцип суперпозиции:

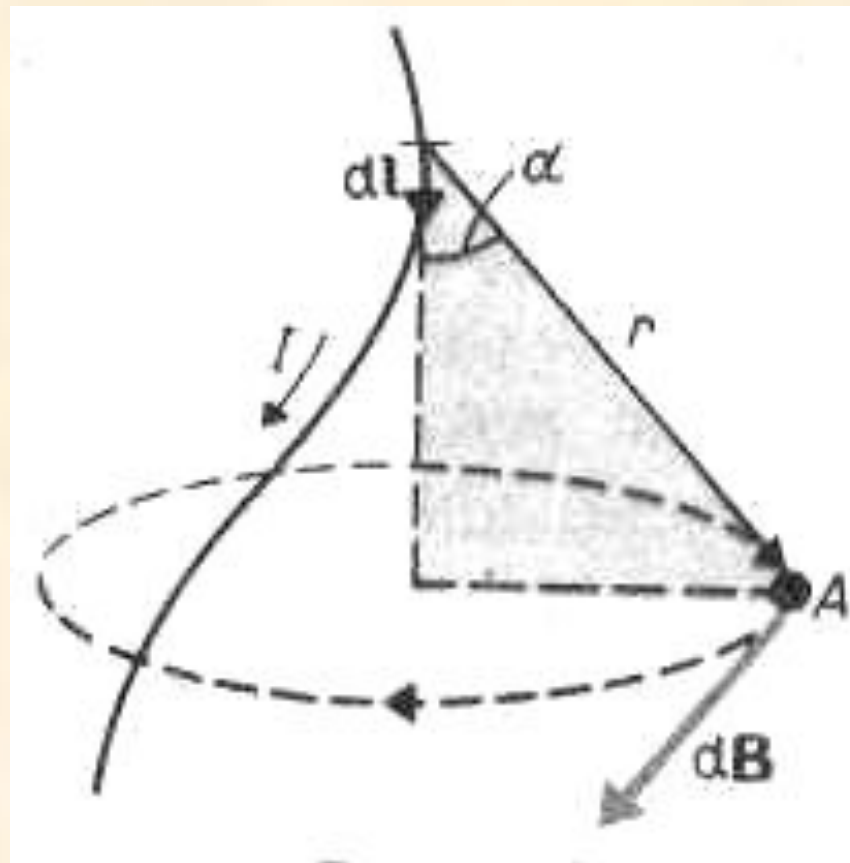
Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

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

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

- Закон Био — Савара — Лапласа для проводника с током  $I$ , элемент которого  $dl$  создает в некоторой точке  $A$  индукцию поля  $d\vec{B}$

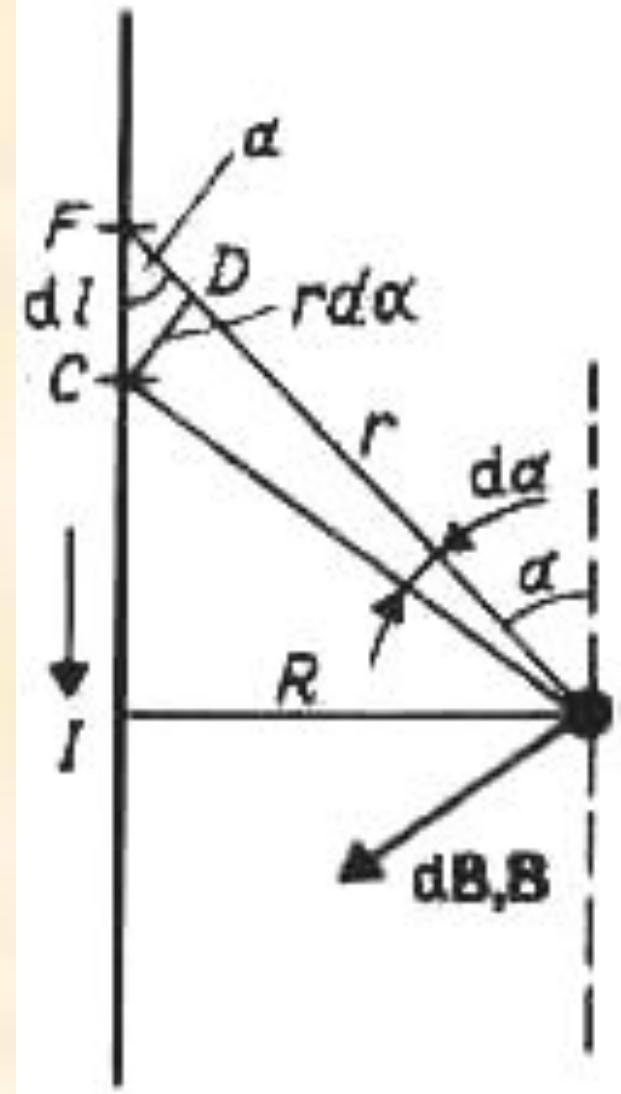


Направление  $d\vec{B}$  определяется правилом векторного произведения векторов или по правилу правого винта.

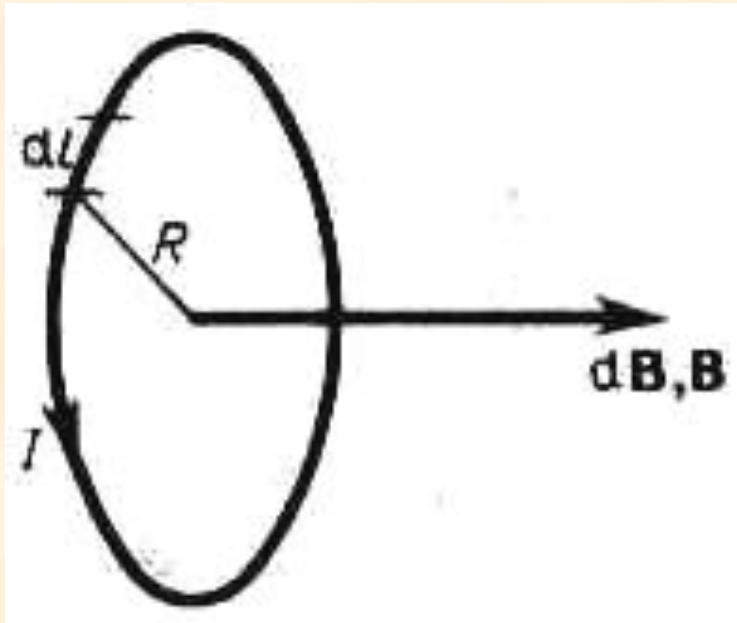
**Магнитное поле прямого тока** — тока, текущего по тонкому прямому проводу бесконечной длины.

В произвольной точке  $A$ , удаленной от оси проводника на расстояние  $R$ , векторы  $d\mathbf{B}$  от всех элементов тока имеют одинаковое направление, перпендикулярное плоскости чертежа («к нам»).

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



- **Магнитное поле в центре кругового проводника с током.**
- Все элементы кругового проводника с током создают в центре магнитное поле одинакового направления — вдоль нормали от витка.



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

### 3. Закон Ампера



**АМПЕР Андре Мари** (1775 – 1836) – французский физик математик и химик.

Основные физические работы посвящены электродинамике. Сформулировал правило для определения действия магнитного поля тока на магнитную стрелку. Обнаружил влияние магнитного поля Земли на движущиеся проводники с током.

В 1820 г. А. М. Ампер экспериментально установил, что два проводника с током взаимодействуют друг с другом с силой:

$$F = k \frac{I_1 I_2}{b}$$

где  $b$  – расстояние между проводниками, а  $k$  – коэффициент пропорциональности зависящий от системы единиц.

В современной записи в системе СИ, **закон Ампера** **выражается формулой:**

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

**Это сила с которой магнитное поле действует на бесконечно малый проводник с током  $I$ .**

Модуль силы действующей на проводник

$$dF = IBdl \sin(\angle d\vec{l}, \vec{B}).$$

Если магнитное поле однородно и проводник перпендикулярен силовым линиям магнитного поля, то

$$F = IlB,$$

Работа силы Ампера

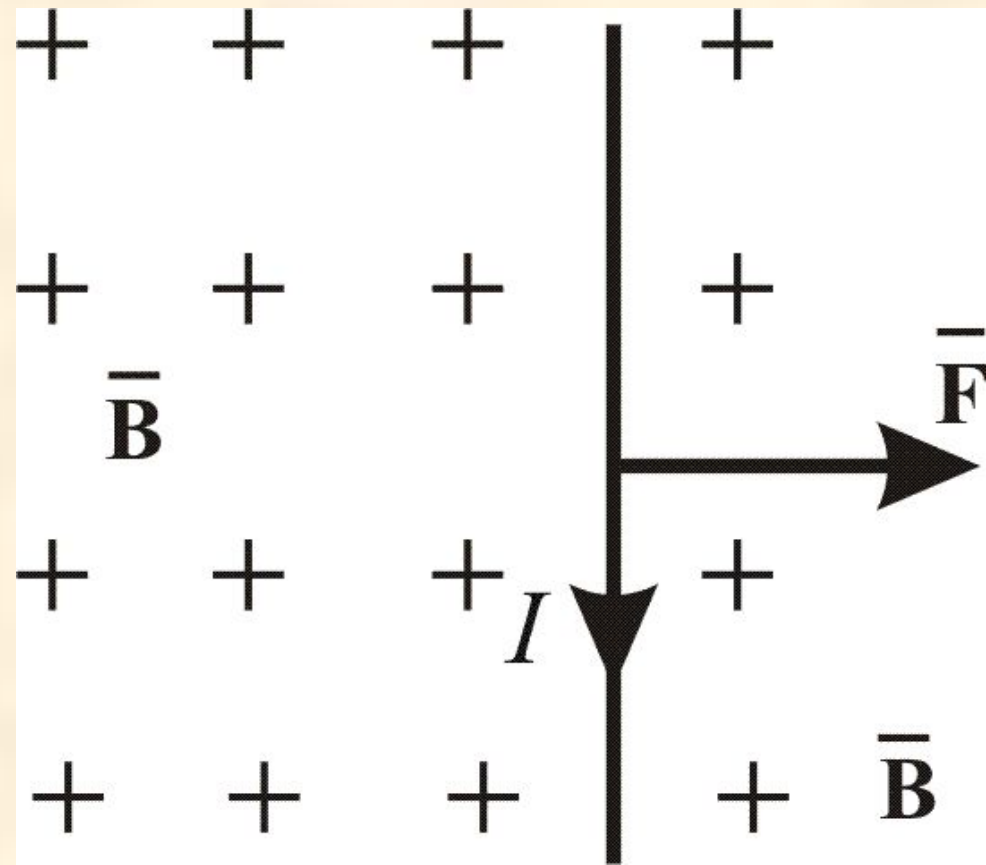
$$dA = F_A \cdot dx = I \vec{B} \cdot dx$$

$$dA = I \cdot (\vec{B} \cdot d\vec{\omega} \cos \alpha)$$

$$dA = I \cdot d\Phi$$



Направление силы определяется направлением векторного произведения или правилом левой руки (что одно и то же). Ориентируем пальцы по направлению первого вектора, второй вектор должен входить в ладонь и большой палец показывает направление векторного произведения.



Физический смысл магнитной индукции:

$B$  – величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на проводник единичной длины, по которому течет единичный ток.

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

Размерность индукции

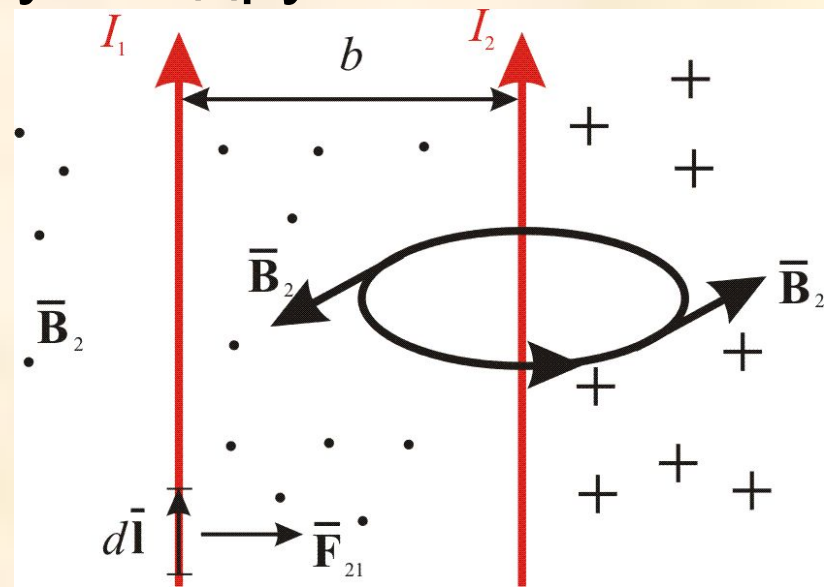
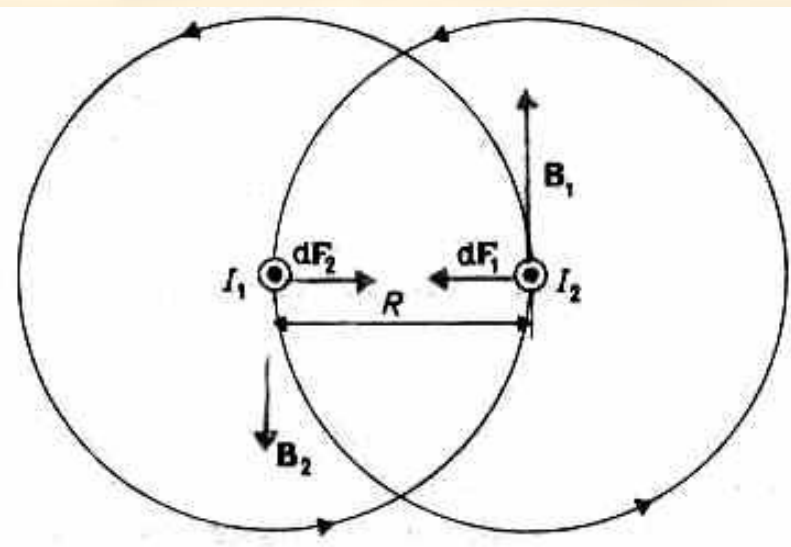
$$[B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

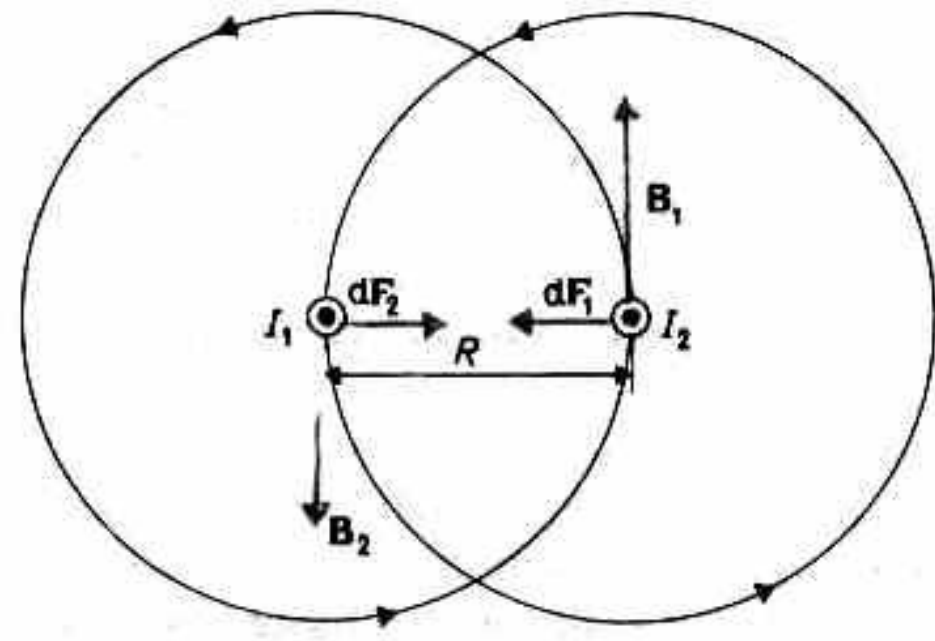
# Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током

Пусть  $R$  – расстояние между проводниками.

Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током.

Два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу, а противоположных направлений отталкиваются друг от друга





$$B_1 = \frac{\mu_o \mu}{4\pi} \frac{2I_1}{R},$$

$$dF_1 = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_o \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl$$

$$B_2 = \frac{\mu_o \mu}{4\pi} \frac{2I_2}{R},$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_o \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl$$

$$dF_1 = dF_2$$

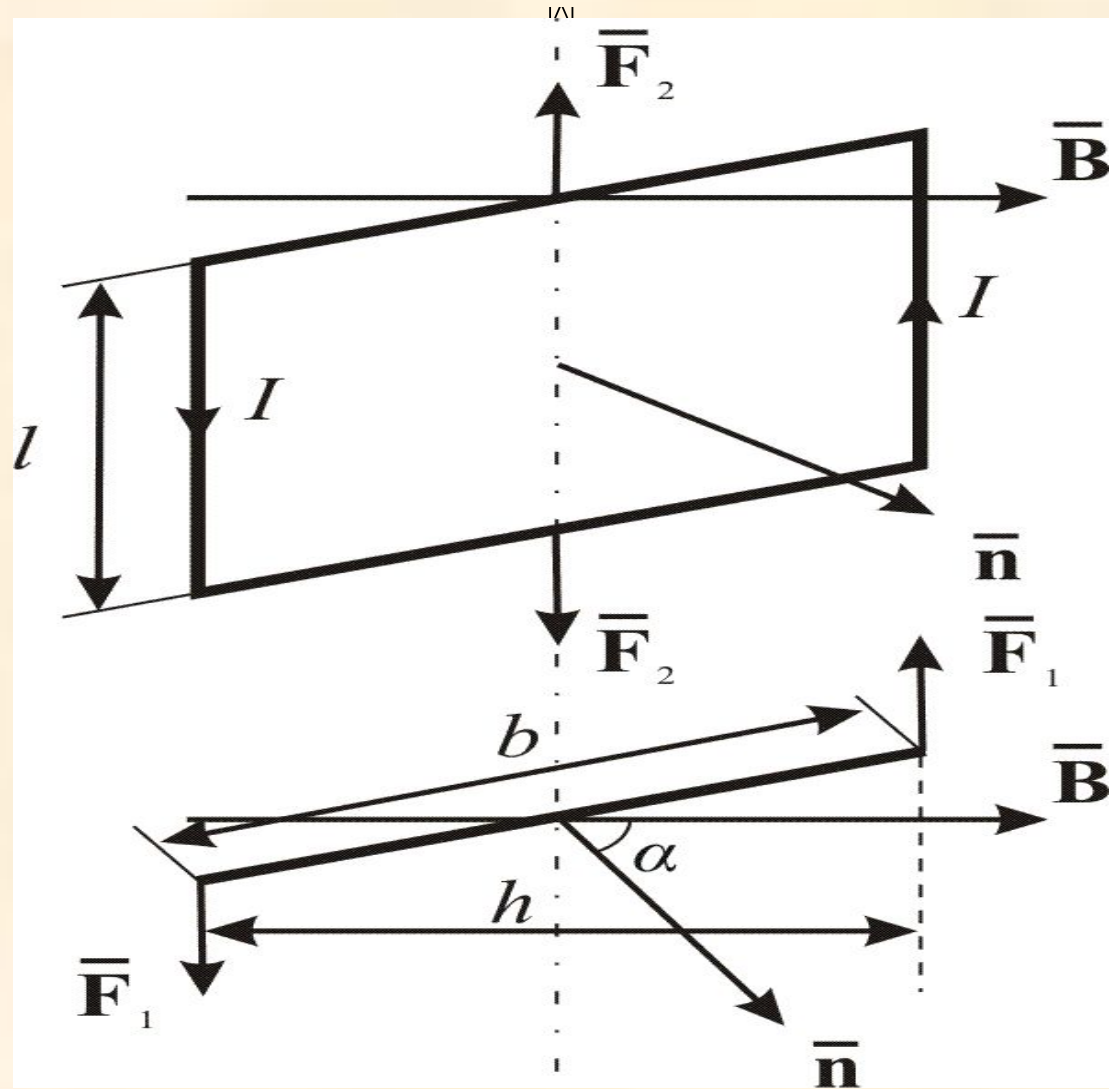
[Вперед](#)

# Воздействие магнитного поля на рамку с током

Рамка с током  $I$

находится в однородном магнитном поле

$\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$   
(направление нормали связано с направлением тока правилом буравчика).



- Сила Ампера, действующая на сторону рамки длиной  $l$ , равна:

$$F_1 = IlB$$

- Вращающий момент равен:

$$M = F_1 h = IlBb \sin \alpha, \quad h = b \sin \alpha.$$

$$M = IBS \sin \alpha = BP_m \sin \alpha$$

$$B = \frac{M}{P_m \sin \alpha} \quad B = \frac{M_{\text{макс}}}{P_m}$$

$M$  – вращающий момент силы,

$P$  – магнитный момент.

## 4. Единицы измерения магнитных величин

Закон Ампера используется для установления единицы силы тока – ампер.

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R}$$

$$dl = 1 \text{ м} \quad R = 1 \text{ м} \quad I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$$

$$\frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Ампер – сила тока неизменного по величине, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенным на расстоянии один метр, один от другого в вакууме вызывает между этими проводниками силу  $2 \cdot 10^{-7} I$

• Тогда 
$$2 \cdot 10^{-7} I = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 2 I^2$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \qquad B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \qquad [B] = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \text{Тл}$$

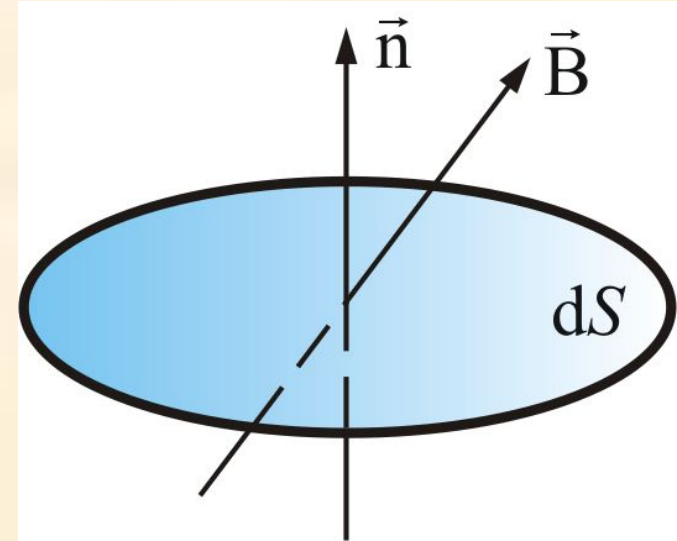


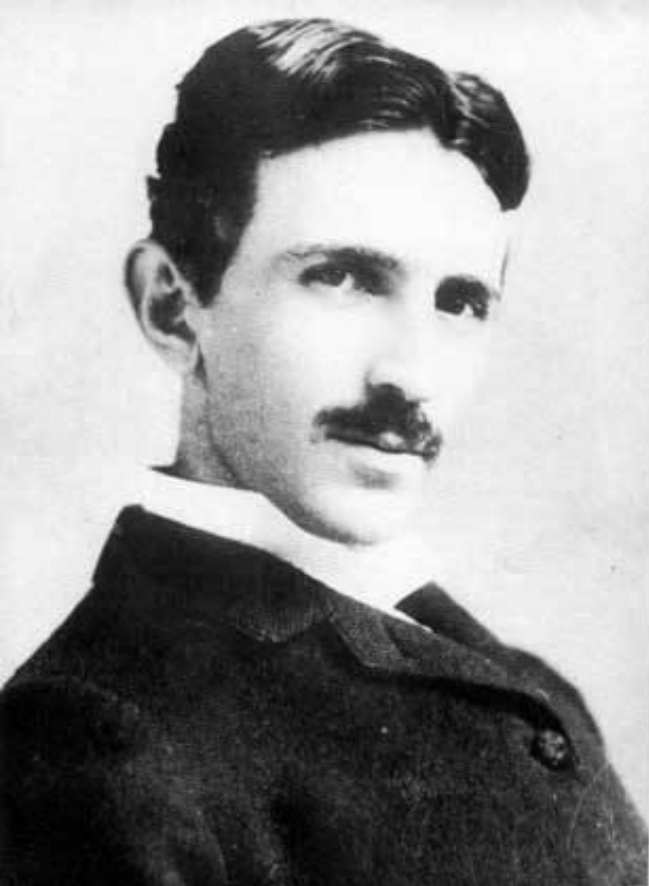
1 Тл (один тесла равен магнитной индукции однородного магнитного поля, в котором) на плоский контур с током, имеющим магнитный момент  $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$  действует вращающий момент  $1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

1 Тл равен магнитной индукции при которой магнитный поток сквозь площадку  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению поля равен  $1 \text{ Вб}$

$$d\hat{O}_B = B d\mathbf{S} \cos(\hat{d\mathbf{n}}, \hat{\mathbf{B}})$$

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$





## **ТЕСЛА Никола (1856 - 1943)- сербский ученый в области электротехники, радиотехники**

Разработал ряд конструкций многофазных генераторов, электродвигателей и трансформаторов. Сконструировал ряд радиоуправляемых самоходных механизмов.

Изучал физиологическое действие токов высокой частоты. Построил в 1899 радиостанцию на 200 кВт в Колорадо и радиоантенну высотой 57,6 м в Лонг-Айленде. Изобрел электрический счетчик, частотомер и др.

# Таблица основных характеристик магнитного поля

Наименование	Обозначение	СИ	СГС	СИ/СГС
Магнитная индукция	$B$	$Tл \left( \frac{H}{A \cdot м} \right)$	Гс	$10^4$
Напряженность магнитного поля	$H$	$A/м$	Э	$4\pi \cdot 10^{-3}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$\frac{H}{A^2}; \frac{\Phi}{м}$	1	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Поток магнитной индукции	$\Phi_B$	$Вб$ ( $Tл \cdot м^2$ )	Мкс	$10^8$

## 5. Сила Лоренца

Сила, действующая на электрический заряд  $q$  во внешнем электромагнитном поле, зависит не только от его местоположения и напряженности электрического поля  $\mathbf{E}(x,y,z)$  в этой точке:  $q\mathbf{E}(x,y,z)$ , но, в общем случае, и от скорости его движения  $\mathbf{v}$  и величины индукции магнитного поля  $\mathbf{B}(x,y,z)$ .

Выражение для этой силы было получено в конце XIX в. голландским физиком Г.А. Лоренцем

## Получим формулу для расчета силы Лоренца

Найдем силу, действующую на один заряд со стороны магнитного поля.

По закону Ампера сила, действующая на проводник с током в магнитном поле

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

ток  $I = jS$ , причем  $j = qn\upsilon$ , тогда

$$d\vec{\mathbf{F}} = qn\upsilon S [d\vec{\mathbf{l}}, \vec{\mathbf{B}}] = qnSdl [\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{B}}],$$

- Т.к.  $nSdl$  – число зарядов в объёме  $Sdl$ , тогда для одного заряда

$$\frac{d\vec{F}}{nSdl} = q[\vec{v}, \vec{B}],$$

$$\vec{F}_л = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_л = qvB \sin \alpha$$



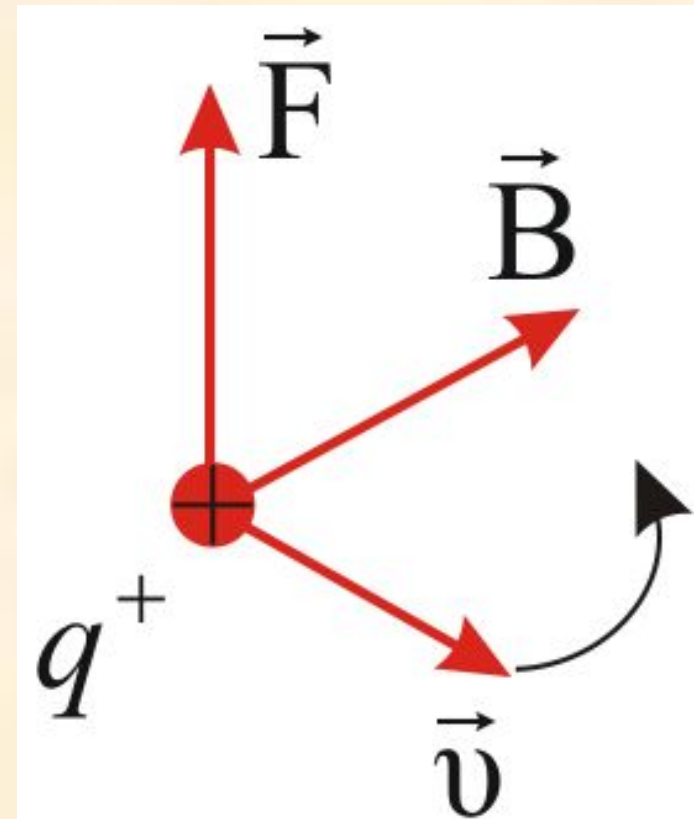
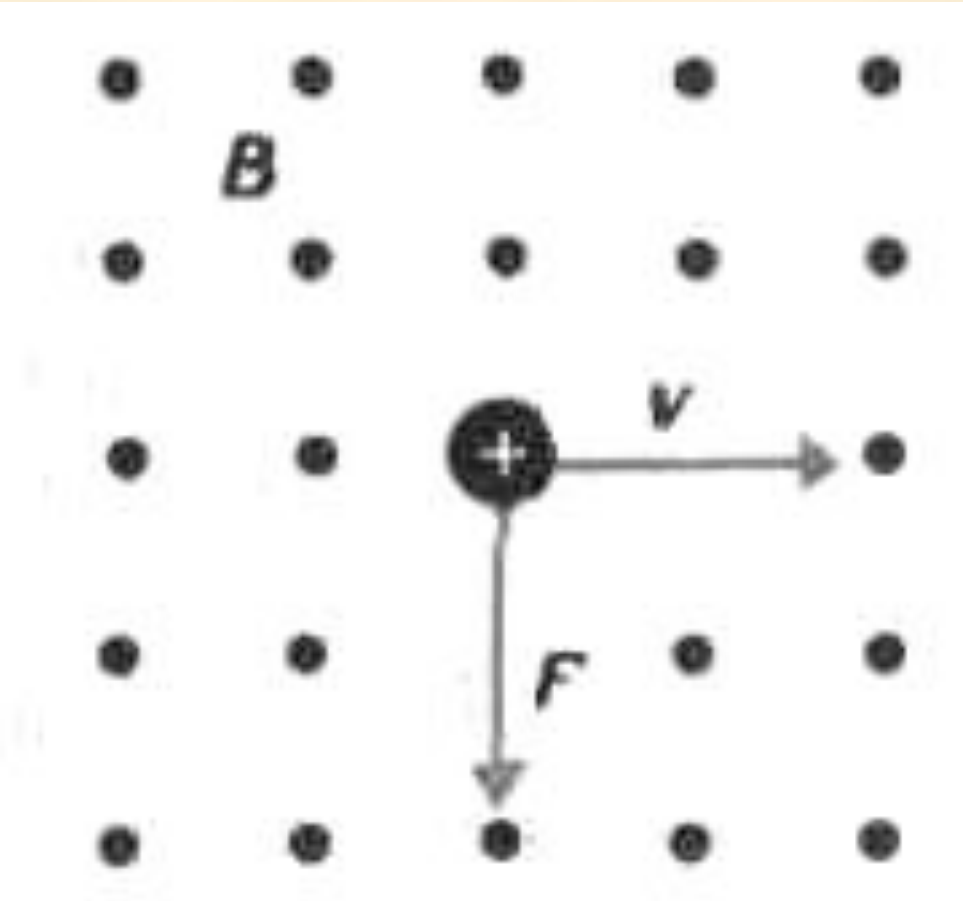
**ЛОРЕНЦ Хендрик Антон (1853 - 1928) –** нидерландский физик-теоретик, создатель классической электронной теории, член Нидерландской АН.

Вывел формулу, связывающую диэлектрическую проницаемость с плотностью диэлектрика, дал выражение для силы, действующей на движущийся заряд в электромагнитном поле (сила Лоренца), объяснил зависимость электропроводности вещества от теплопроводности, развил теорию дисперсии света. Разработал электродинамику движущихся тел.

В 1904 вывел формулы, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета (преобразования Лоренца)

Направлена сила Лоренца перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

К движущемуся положительному заряду применимо правило левой руки или «правило буравчика»



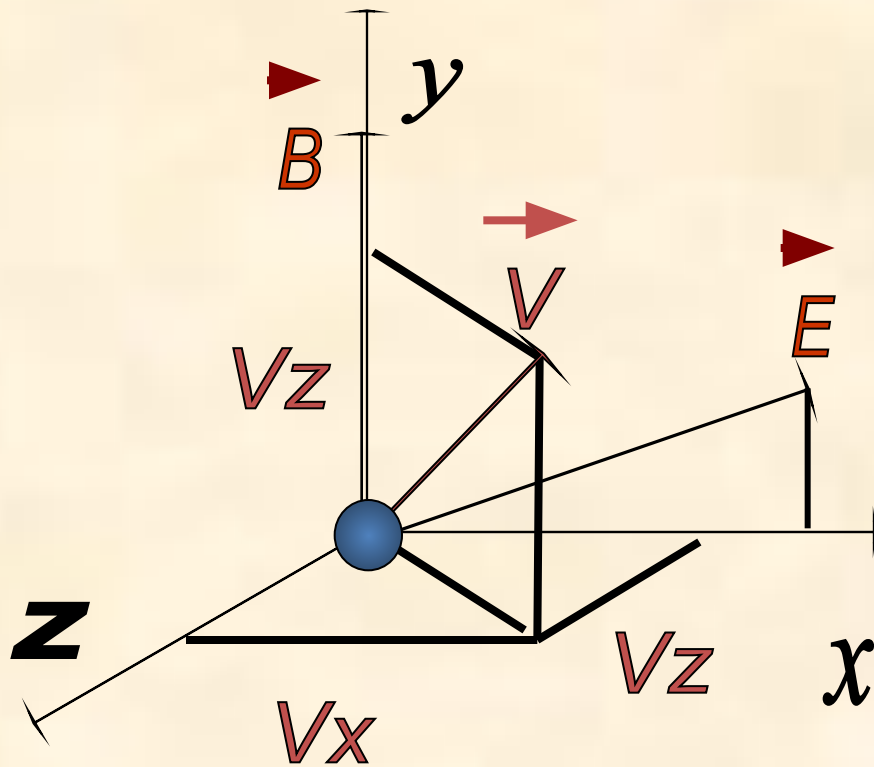


- Направление действия силы для отрицательного заряда – противоположно, следовательно, к **электронам применимо правило правой руки.**

$$A = F_{\ddot{E}} \cdot dr \cdot \cos \alpha = 0, \cos \alpha = \cos 90^\circ = 0$$

- Часто лоренцевой силой называют сумму электрических и магнитных сил:

$$\vec{F}_l = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$



Используем законы:

$$\vec{F} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_K + \vec{F}_L$$

$$\vec{F}_L = q[\vec{V} \vec{B}]$$

$$\vec{F}_K = q\vec{E}$$

# Основные выводы

## Сила Лоренца:

Полная сила, действующая на заряд в электромагнитном поле, равна

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

Магнитная составляющая силы Лоренца перпендикулярна вектору скорости, элементарная работа этой силы равна нулю.

Сила  $F_m$  меняет направление движения, но не величину скорости.

[Модель](#) Модель

[Пример](#)

## 6. Циркуляция вектора магнитной индукции

Возьмем контур  $l$  охватывающий прямой ток  $I$ , и вычислим для него циркуляцию вектора магнитной индукции т.е.

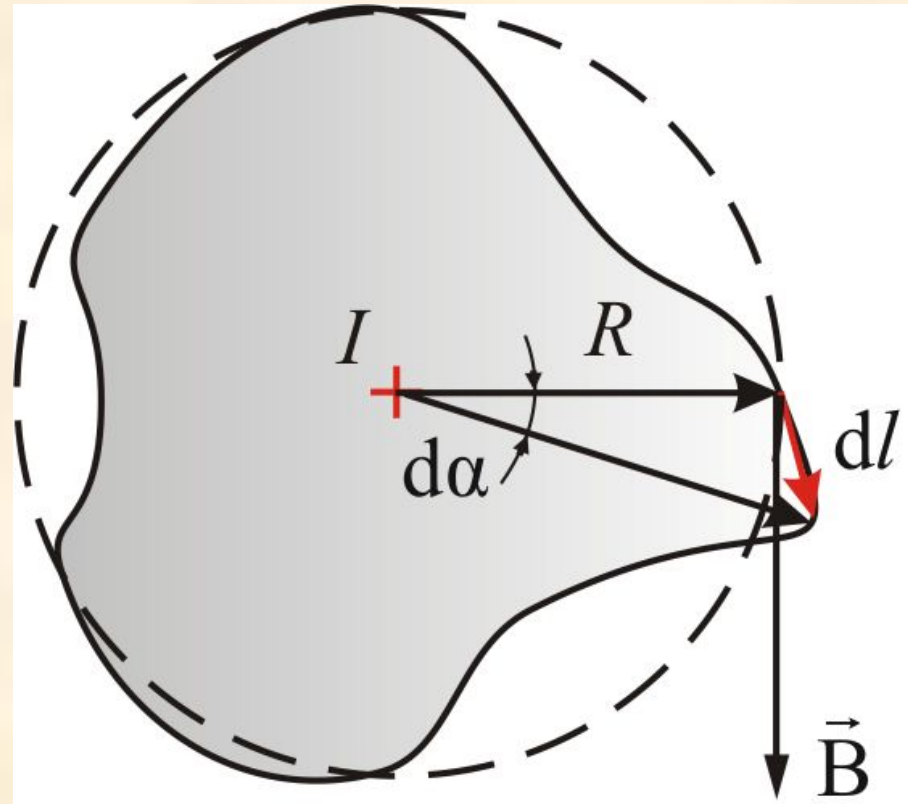
$$\oint B_l \, dl$$

$$B_l dl = B dl_B,$$

$$dl_B = R d\alpha$$

$$B_l dl = B dl_B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} R d\alpha =$$

$$= \frac{\mu_0 I d\alpha}{2\pi}$$



$$\oint B_l \, dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha = \mu_0 I,$$

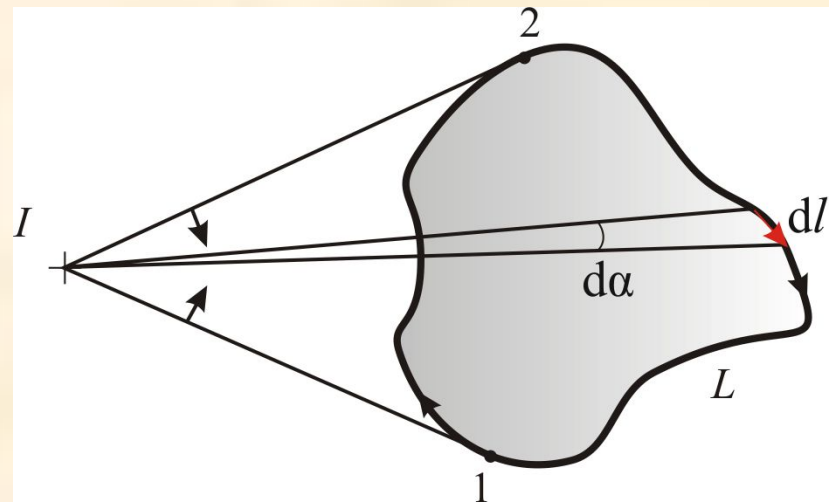
• это теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ :

циркуляция вектора магнитной индукции равна току, охваченному контуром, умноженному на магнитную постоянную:

$$\oint B_l \, dl = \mu_0 I$$

Если ток не охватывается контуром

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{l} = 0$$



- Если контур охватывает несколько токов, то

$$\oint B_l dl = \mu\mu_0 \sum I_i$$

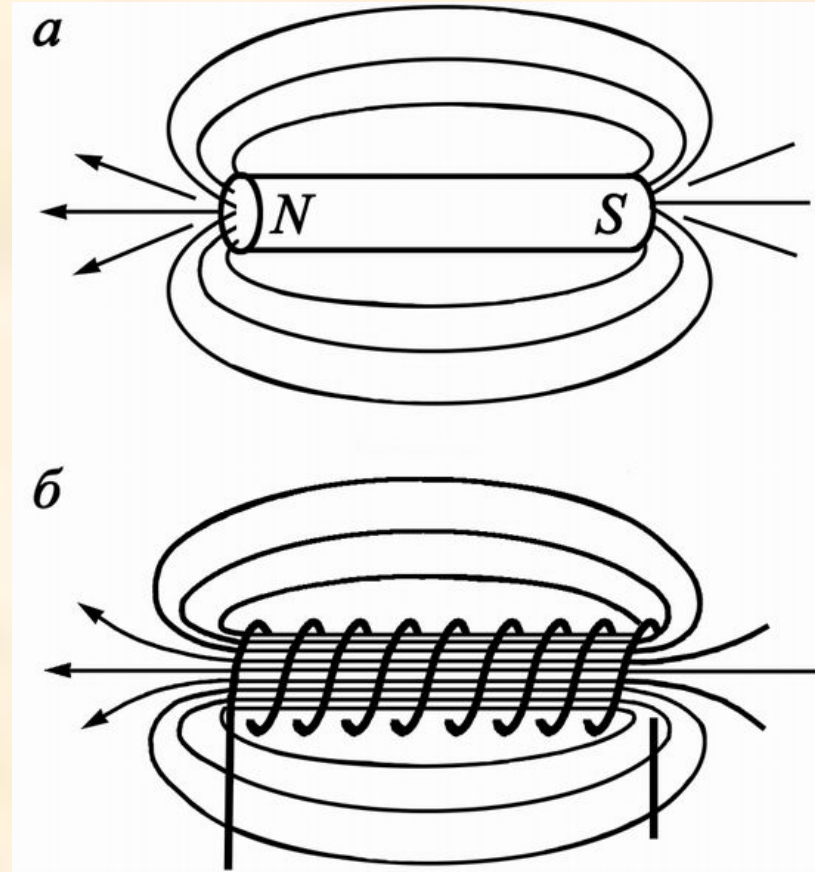
- циркуляция вектора  $B$  равна алгебраической сумме токов, охваченных контуром произвольной формы.
- Магнитные поля называют **вихревыми** или **соленоидальными**.

Магнитному полю нельзя приписывать потенциал.

$$\oint E_l dl = 0$$

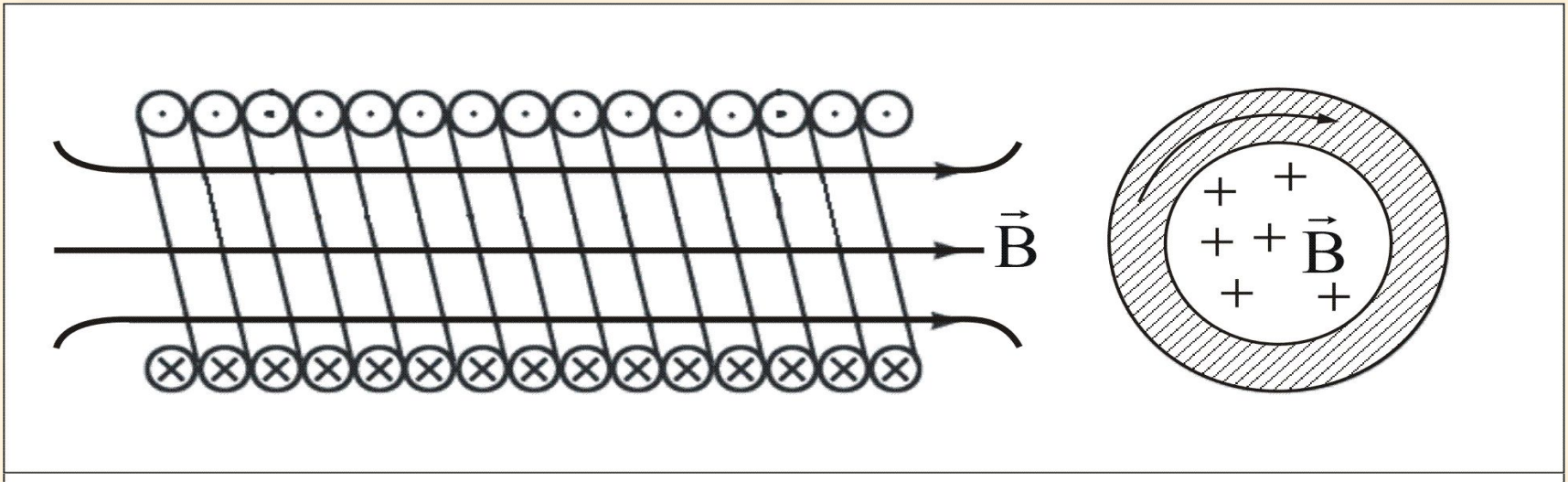
- Линии напряженности электрического поля начинаются и заканчиваются на зарядах.
- Магнитных зарядов в природе нет. Опыт показывает, что линии  $\mathbf{B}$  всегда замкнуты
- Поэтому **теорема Гаусса** для вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  записывается так:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$



## 7. Магнитное поле соленооида

- Бесконечно **длинный соленоид** - тонкий провод, намотанный плотно виток к витку на цилиндрический каркас
- Соленоид можно представить в виде системы одинаковых круговых токов с общей прямой осью.
- Поле внутри и вне соленооида однородное.





- **магнитная индукция внутри соленоида**

$$B = \mu\mu_0 nI.$$

- где  $n$  – число витков на единицу длины,  $I$  – ток в соленоиде (в проводнике).

- **Вне соленоида:**

$$\sum I_i = 0 \quad \oint B_l dl = Bl = 0 \quad B = 0$$

- Бесконечно длинный соленоид аналогичен плоскому конденсатору.
- Произведение  $nI$  – называется **число ампер витков на метр**.

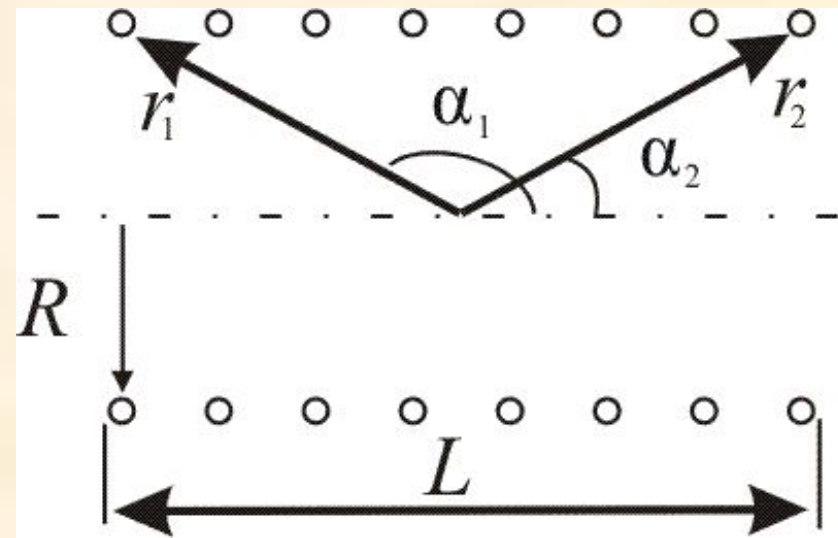
-В точке, лежащей на середине оси конечного соленооида магнитное поле будет максимальным:

$$B_{\max} = \mu_0 \mu n I \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}},$$

где  $L$  – длина соленооида,  $R$  – диаметр витков.

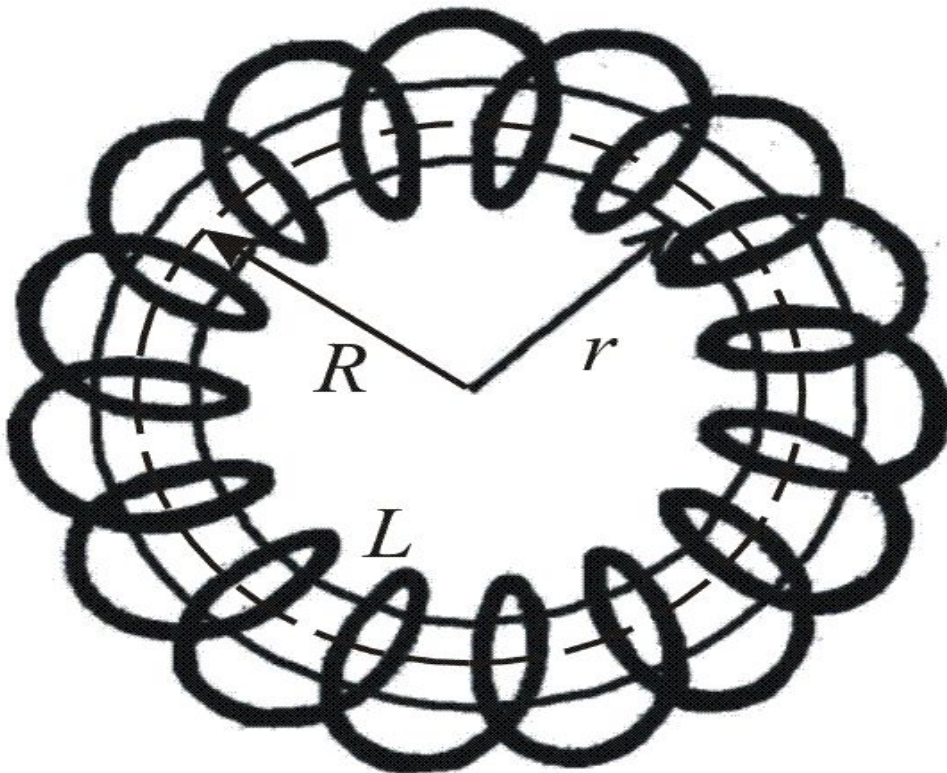
-В произвольной точке конечного соленооида

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 \mu n I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$



# Магнитное поле тороида

- **Тороид** представляет собой тонкий провод, плотно (виток к витку) намотанный на каркас в форме тора (бублика).
- Возьмём контур  $L$  в виде окружности радиуса  $r$ , центр которого совпадает с центром тора  $R$ .



- Внутри тора

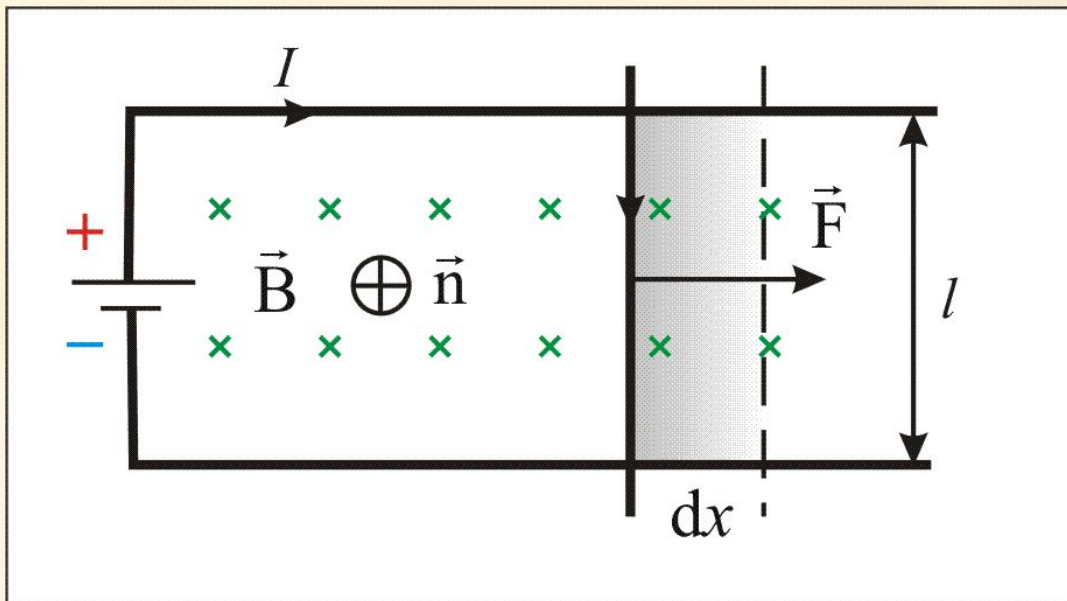
$$B = \mu\mu_0 nI \frac{R}{r}$$

- Контур вне тороида токов не охватывает, поэтому вне тороида

$$B = 0$$

## 8. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

- Рассмотрим **контур с током**, образованный неподвижными проводами и скользящей по ним подвижной перемычкой длиной  $l$
- Этот контур находится во внешнем однородном магнитном поле  $\vec{B}$ , перпендикулярном к плоскости контура.



На элемент тока  $I$  (подвижный провод) длиной  $l$  действует **сила Ампера**, направленная вправо:

$$F = IlB.$$

Пусть проводник переместится параллельно самому себе на расстояние  $dx$ . При этом совершится работа:

$$dA = Fdx = IBldx = IBdS = Id\Phi.$$

$$dA = Id\Phi.$$

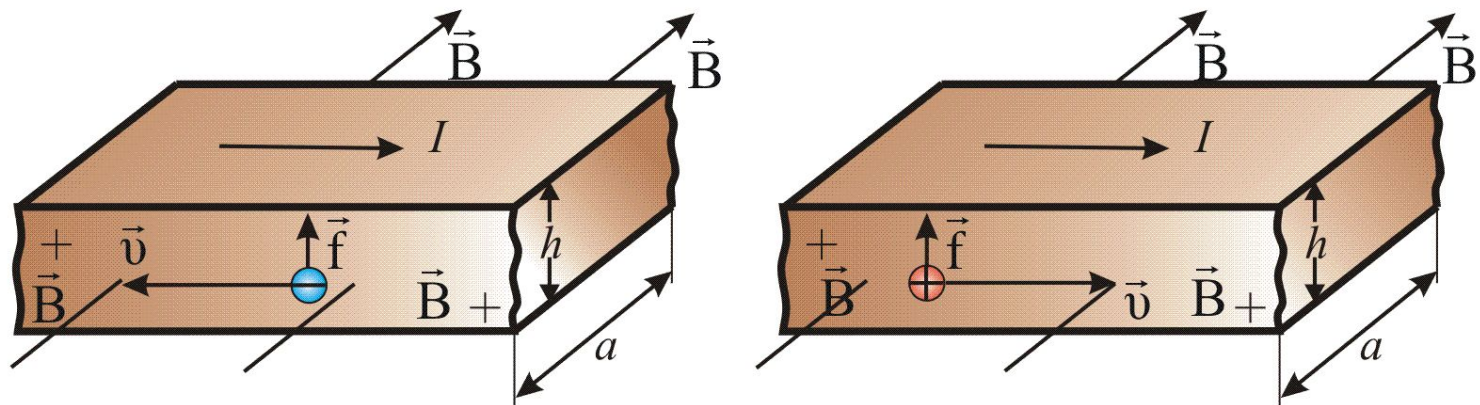
**Работа**, совершаемая проводником с током при перемещении, численно **равна произведению тока на магнитный поток**, пересечённый этим проводником.

## 9. Эффект Холла

- Одним из проявлений магнитной составляющей силы Лоренца в веществе служит эффект, обнаруженный в 1879 г. американским физиком Э. Г. Холлом (1855–1938).
- 
- Эффект Холла состоит в возникновении на **боковых гранях** проводника с током, помещенного в поперечное магнитное поле, **разности потенциалов**, пропорциональной величине тока  $I$  и индукции магнитного поля  $B$ .

Представим себе проводник в виде плоской ленты, расположенной в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  направленной от нас.

В случае а) верхняя часть проводника будет заряжаться отрицательно, в случае б) положительно.





- Это позволяет экспериментально определить знак носителя заряда в проводнике.
- При равной концентрации носителей заряда обоих знаков возникает **холловская разность потенциалов**.
- Подсчитаем величину холловской разности потенциалов ( $U_x$ ).
- Обозначим:  $E_x$  – напряженность электрического поля, обусловленного ЭДС Холла,  $h$  – толщина ленты проводника.

- $$U_x = E_x h.$$

- Перераспределение зарядов прекратится, когда сила  $qE_x$  уравновесит лоренцеву силу, т.е.

или

$$qE_x = qvB \quad E_x = Bv.$$

- $j = nvq \quad v = \frac{j}{nq} \quad E_x = B \frac{j}{nq}$

$$U_x = \frac{jBh}{nq} \quad \text{или} \quad U_x = \frac{BhI}{nqS} = \frac{BI}{qna} = \frac{RBI}{a},$$

- Где  $R = 1 / qn$  – коэффициент Холла.

# Холловская разность потенциалов

$$U_x = \frac{BI}{qna} = \frac{RBI}{a}$$

Где  $R = 1 / qn$  – коэффициент Холла.

- Исследования ЭДС Холла привели к удивительным выводам:
- Металлы могут обладать проводимостью  $p$  – типа (Zn, Cd – у них дырки более подвижные, чем электроны).
- Это металлы с чуть перекрывающимися знаками, т. е. полуметаллы.

Число носителей заряда:

$$n = \frac{IB}{qaU_x}$$

Измерение Холловской разности потенциалов позволяет определить:

- 1) знак заряда;
- 2) количество носителей.