

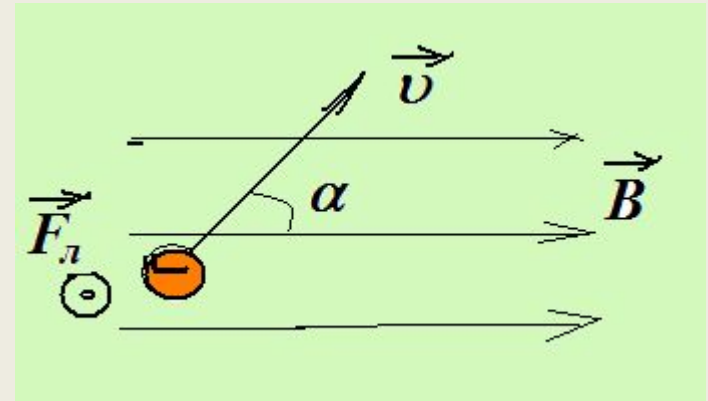
# **МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ. Часть 2**

# Сила, действующая на заряды в магнитном поле (сила Лоренца).

Опыт :

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

Направление  $\vec{F}_L$  находится по правилу правого винта (можно- по правилу левой



$$\vec{F}_L \perp \vec{v}, \vec{B};$$

Т.е. сила Лоренца –

центростремительная, она меняет

направление скорости, а модуль ее не остается

меняет. Кинетическая энергия частицы постоянной.

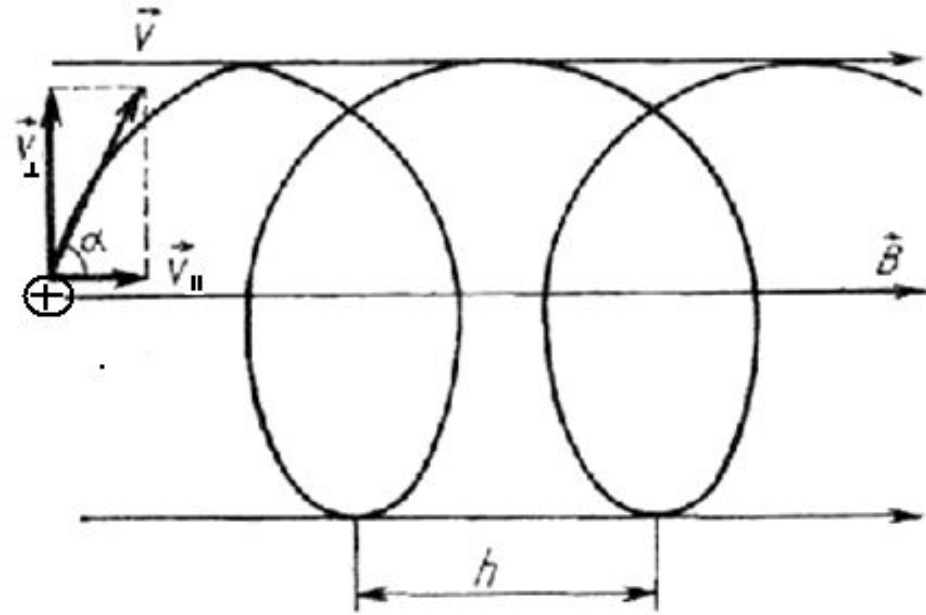
При  $\vec{v} = 0$   $F_L = 0$ . Сила Лоренца действует только на

и движущиеся заряды.

Модуль  
силы

$$F_L = qvB \sin \alpha$$

$$\alpha = \vec{v} \wedge \vec{B};$$



$$V_{\perp} = V \sin \alpha;$$

$$V_{\parallel} = V \cos \alpha.$$

$$m \frac{V_{\perp}^2}{R} = |q| V_{\perp} B \Rightarrow R = \frac{m V_{\perp}}{|q| B};$$

$$\omega = \frac{V_{\perp}}{R} = \frac{V_{\perp} |q| B}{m V_{\perp}} = \frac{|q|}{m} B;$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{|q| B};$$

$$h = V_{\parallel} T = 2\pi \frac{m V_{\parallel}}{|q| B}.$$

В общем случае электрическое поле и магнитное поле являются компонентами **единого электромагнитного поля**, действие которого на движущуюся в нем заряженную частицу описывается опытным законом:

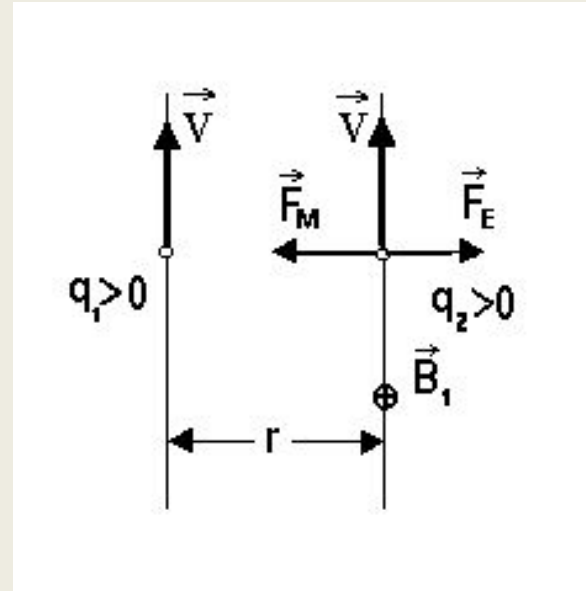
$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Этот слайд –  
факультатив!

## Сравнение сил Кулоновского и магнитного взаимодействия.

Рассмотрим две одноименно  
заряженные частицы, движущиеся  
параллельно  
друг другу с одинаковыми  
скоростями  $v$ .

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



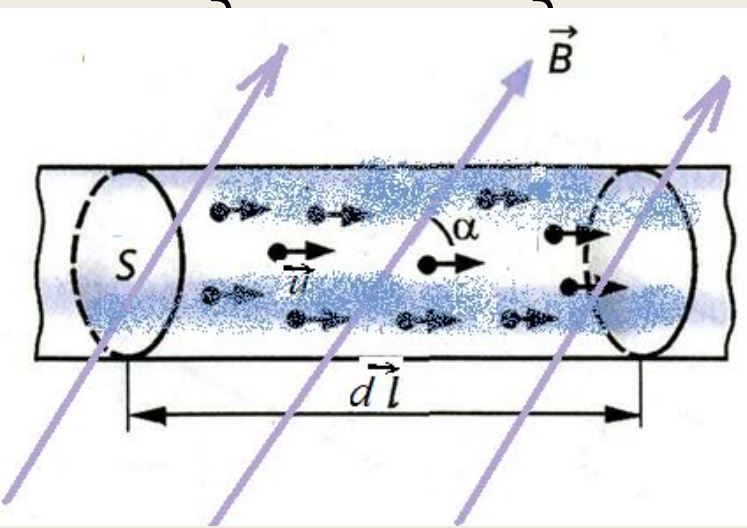
$$F_M = q_2 v B_1 = q_2 \cdot v \cdot \frac{\mu_0 q_1 v}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 q_1 q_2 v^2}{4\pi r^2}$$

$$\frac{F_M}{F_E} = \mu_0 \epsilon_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2}$$

- Магнитные силы взаимодействия  
становятся сравнимыми с  
электростатическими только для  
релятивистских зарядов.

# Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера.

На элемент проводника с током, находящийся в магнитном поле, действует сила Ампера, являющаяся результатом действия магнитных сил на носители



сила, действующая на носитель заряда:

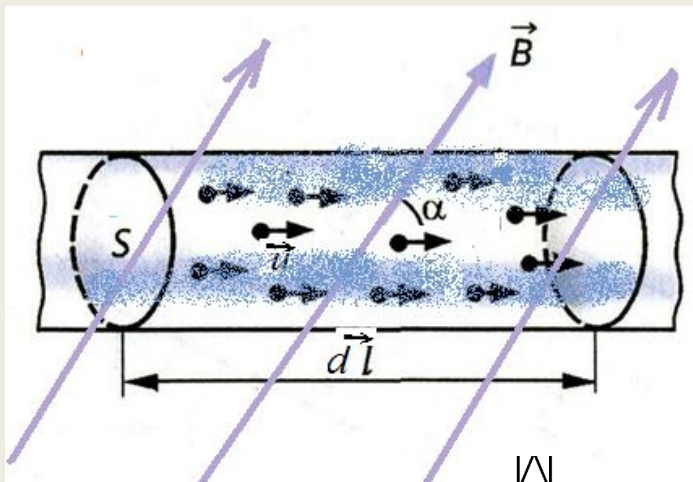
$$\vec{F}_m = q_0 [(\vec{v} + \vec{u}) \vec{B}]$$

$$\langle \vec{v} + \vec{u} \rangle = \langle \vec{v} \rangle + \langle \vec{u} \rangle = \langle \vec{u} \rangle$$

$$\langle \vec{v} \rangle = 0 \quad \langle \vec{F}_m \rangle = q_0 [\langle \vec{u} \rangle \vec{B}].$$

Умножим среднюю силу на полное число носителей, содержащихся в элементе проводника

$$dN = nSd\ell$$



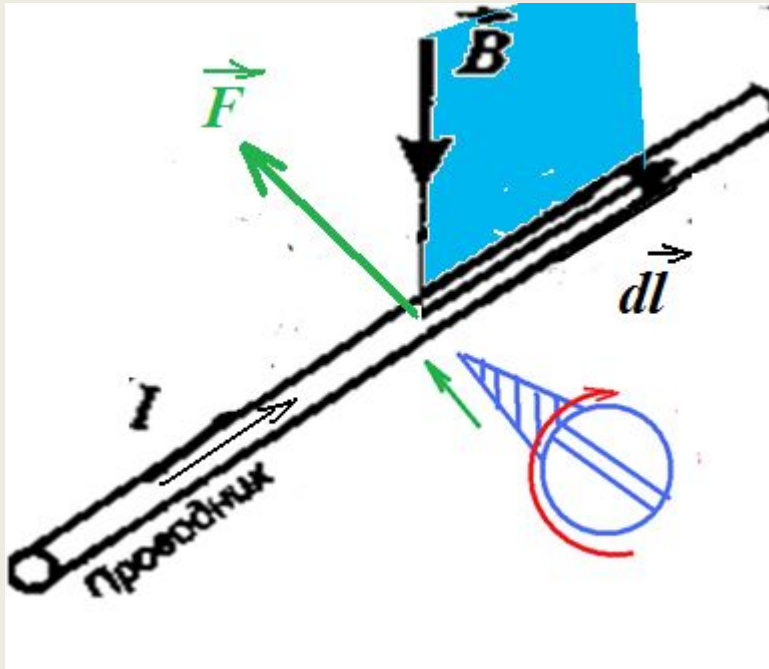
$$d\vec{F} = dN \langle \vec{F}_m \rangle = q_0 n [\langle \vec{u} \rangle \vec{B}] S d\ell$$

$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{u} \rangle, \quad j d\vec{\ell} = \vec{j} d\vec{\ell}$$

$$d\vec{F} = [\vec{j}\vec{B}] S d\ell = [\vec{j} d\ell S \vec{B}] = [\vec{j} d\ell S \vec{B}] = [j d\vec{\ell} S \vec{B}] = I [d\vec{\ell} \vec{B}]$$

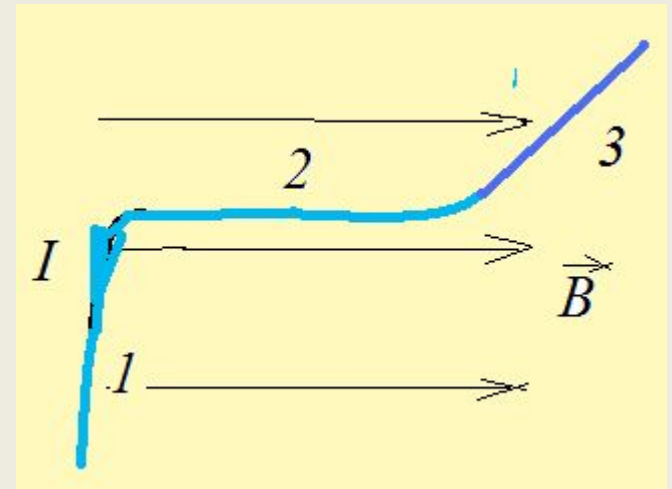
$$d\vec{F} = I [d\vec{\ell} \vec{B}]$$

- сила Ампера, действующая со стороны внешнего магнитного поля на элемент проводника с током.



$$d\vec{F} = I [d\vec{\ell} \times \vec{B}]$$

Направление силы Ампера находится по правилу буравчика или по правилу левой руки.



Сила, действующая на линейный проводник произвольной конфигурации, по которому течет постоянный ток:

$$\vec{F} = \int_L d\vec{F} = I \int_L [d\vec{\ell} \times \vec{B}]$$



# Магнитное взаимодействие двух тонких бесконечно длинных параллельных проводников с токами.

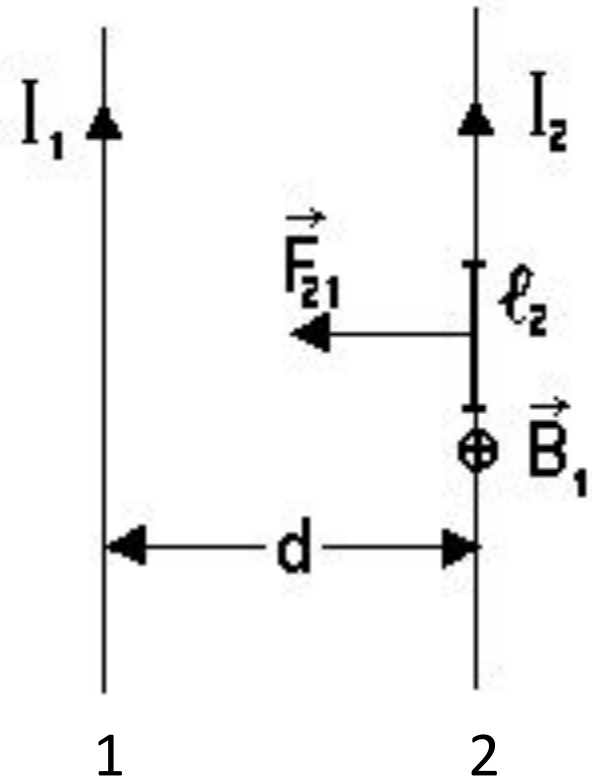
Во всех точках проводника 2 индукция магнитного поля, создаваемого проводником 1, имеет од  
направле

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

$$F_{21} = I_2 B_1 \ell_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell_2$$

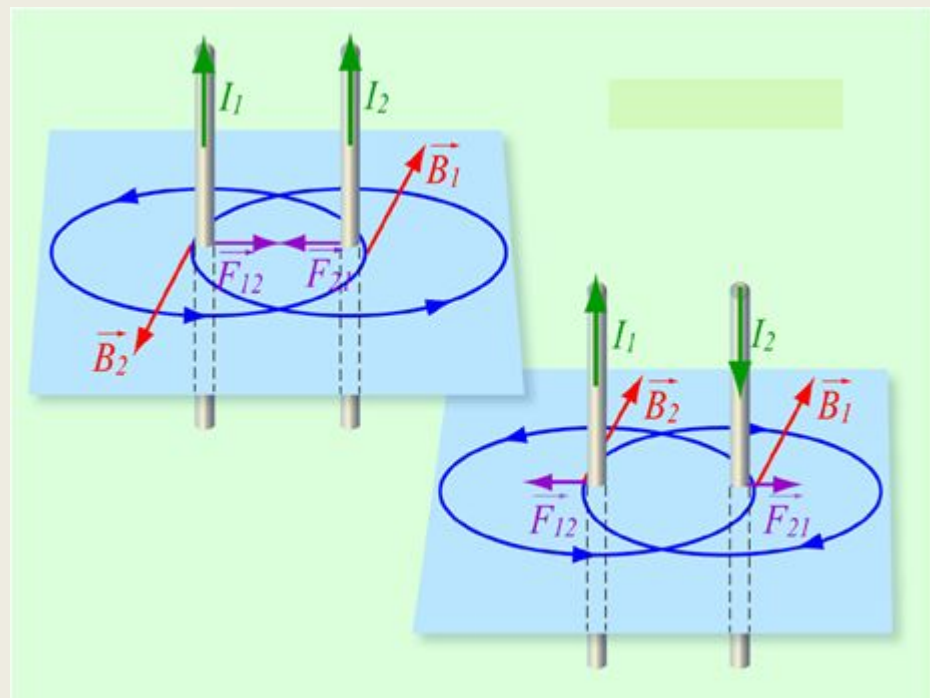
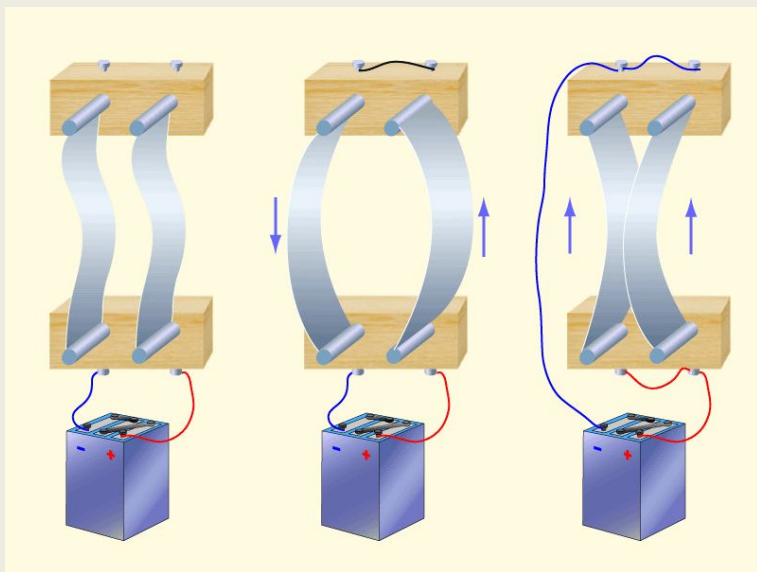
На единицу длины проводника действует сила

$$f_{21} = f_{12} = \frac{F_{21}}{\ell_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$



$$F_{21} = I_1 B_2 \ell_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell_1$$

**Токи одинакового направления притягиваются, противоположного направления - отталкиваются.**



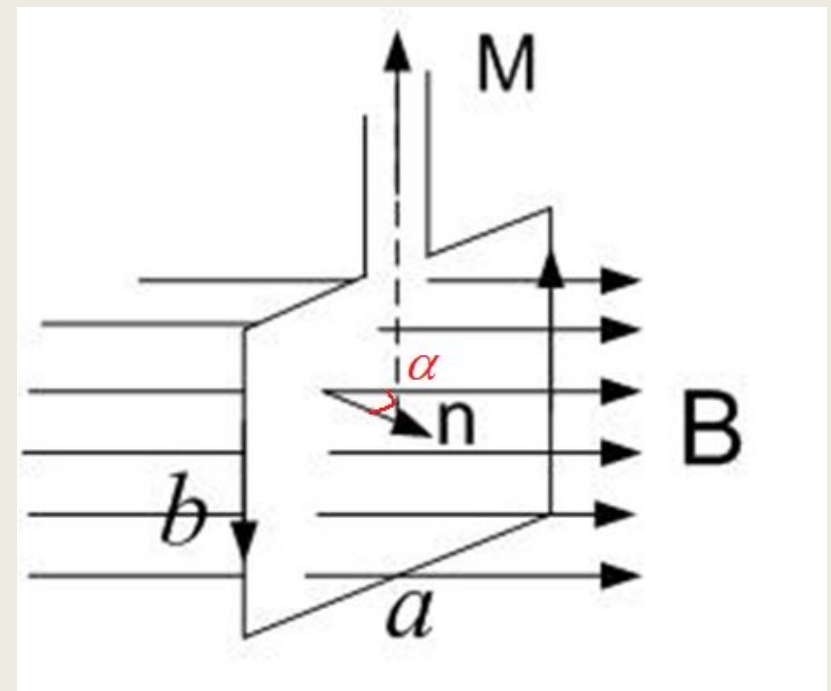
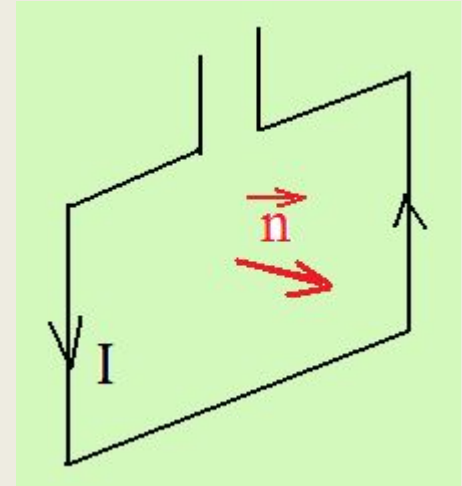
# Магнитный поток

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} dS \cos \alpha = \int_S B_n dS$$

Магнитный поток определяется полным числом силовых линий, проходящих через данную поверхность

Знак потока зависит от  $\cos \alpha$ . Поток вектора  $B$  связывают с контуром, по которому течет ток.

Положительное направление нормали к контуру связывается с током **правилом правого**



# Механическая работа перемещения проводника с током в магнитном поле.

Проводник длины  $l$  перемещается под действием силы Ампера по направляющему на отрезок  $dx$ . На рис. направление вектора магнитной индукции перпендикулярно  $l$  и  $dx$ .

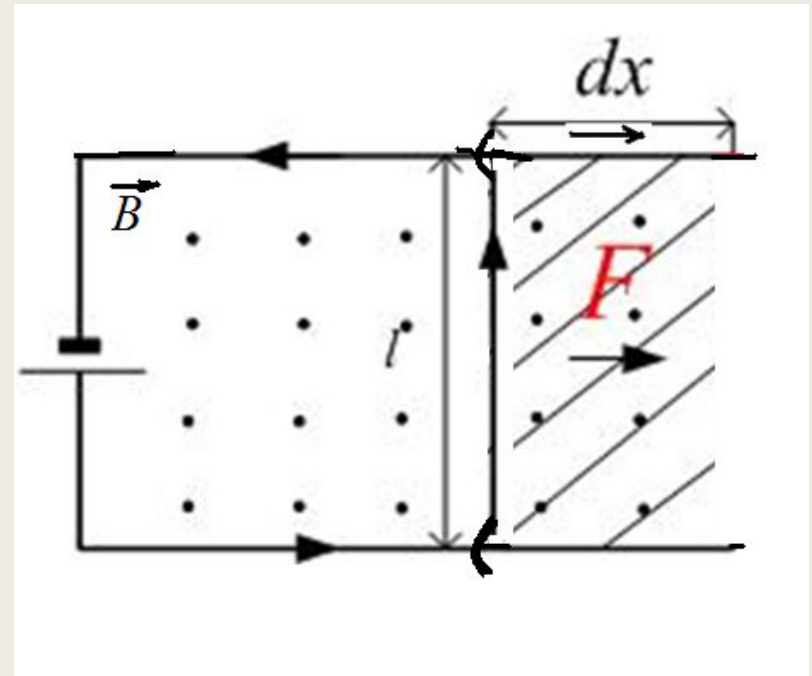
$$\delta A = F dx$$

Сила Ампера, действующая на проводник

$$F = IBl$$

$$\delta A = IBl dx = IB dS$$

Для произвольного направления вектора магнитной индукции используем в расчетах составляющую  $B_n$ , перпендикулярную  $dS$ .



$$\delta A = IB_n dS$$

$$\delta A = IB_n dS = Id\Phi$$

Если проводник совершает конечное перемещение,  
то

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1)$$

$(\Phi_2 - \Phi_1)$  - приращение потока.

Сила тока в контуре при этом поддерживается  
постоянной  
Это выражение справедливо и при перемещении  
замкнутого контура с током в магнитном поле.

# Контур с током во внешнем однородном магнитном поле.

## 1. СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА КОНТУР В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

По закону Ампера на элемент контура с током действует сила

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

Результирующая таких элементарных сил определяется интегрированием вдоль всей длины контура

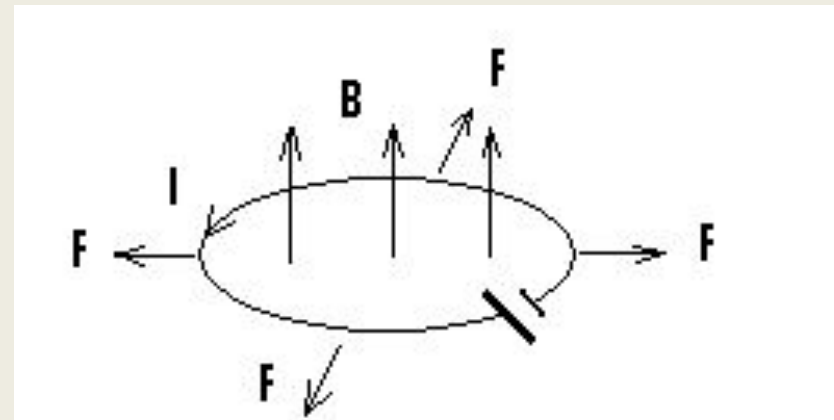
$$\vec{F} = \oint_L I [d\vec{l} \times \vec{B}].$$

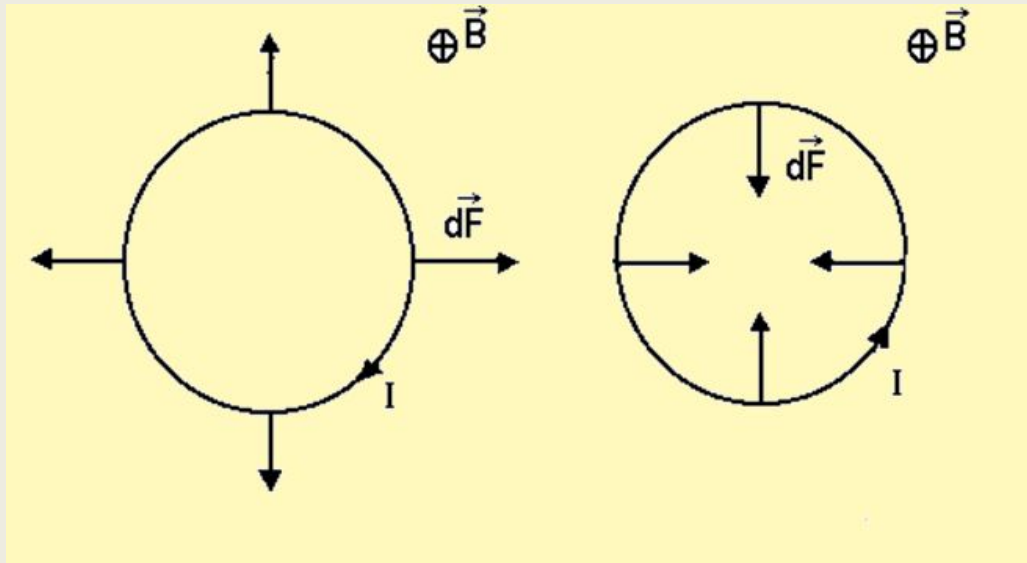
В случае однородного поля и плоского контура

$$\vec{B} = \text{const} \Rightarrow \vec{F} = I \left[ \left( \oint_L d\vec{l} \right) \times \vec{B} \right];$$

$$\oint_L d\vec{l} = 0 \Rightarrow \vec{F} = 0.$$

Это справедливо и для контура произвольной конфигурации.





**Результирующая сила, действующая со стороны однородного магнитного поля на произвольный контур с током, равна нулю.**

Однако момент пары сил, действующих на противоположные стороны контура, может быть отличен от нуля и вызывать его поворот в магнитном поле.

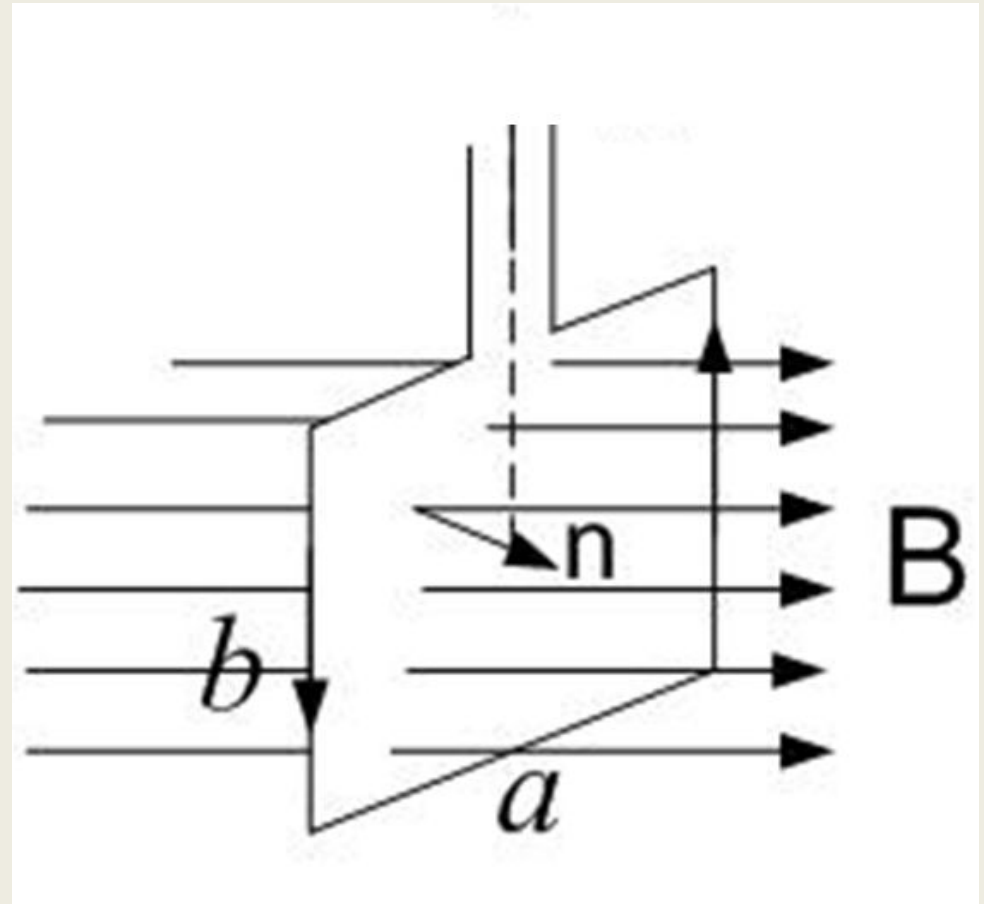
Рассмотрим механический момент сил, действующий на плоский контур с током в магнитном поле.

## 2. Момент сил, действующий на контур с током во внешнем однородном магнитном поле.

Силы, действующие на ребра  $a$ , перпендикулярны к ним и линиям магнитной индукции и стремятся растянуть или сжать виток.

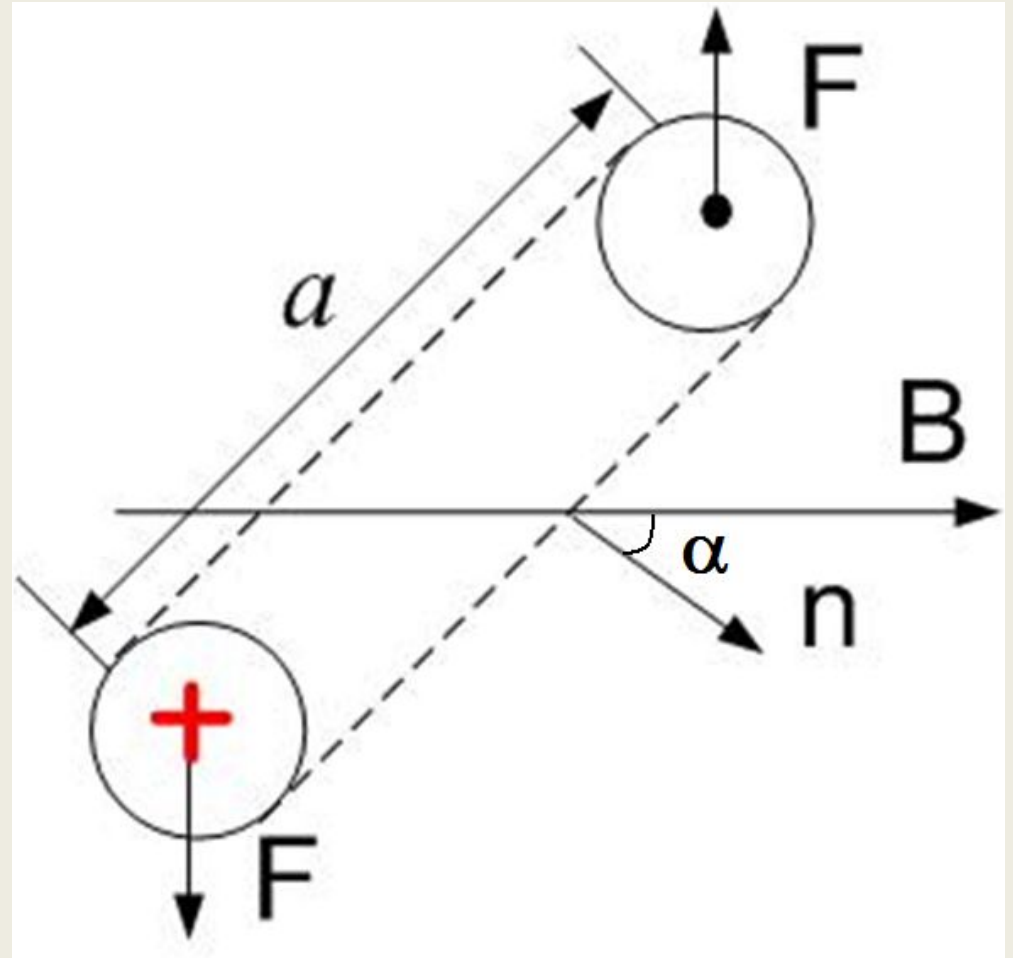
**Силы, действующие на ребра  $b$ , стремятся повернуть виток, чтобы его плоскость стала**

**перпендикулярна линиям магнитной индукции.**





**Силы, действующие на ребра  $b$ , стремятся повернуть виток, чтобы его плоскость стала перпендикулярна линиям магнитной индукции.**



*На виток действует пара сил с некоторым моментом сил  $M$ .*

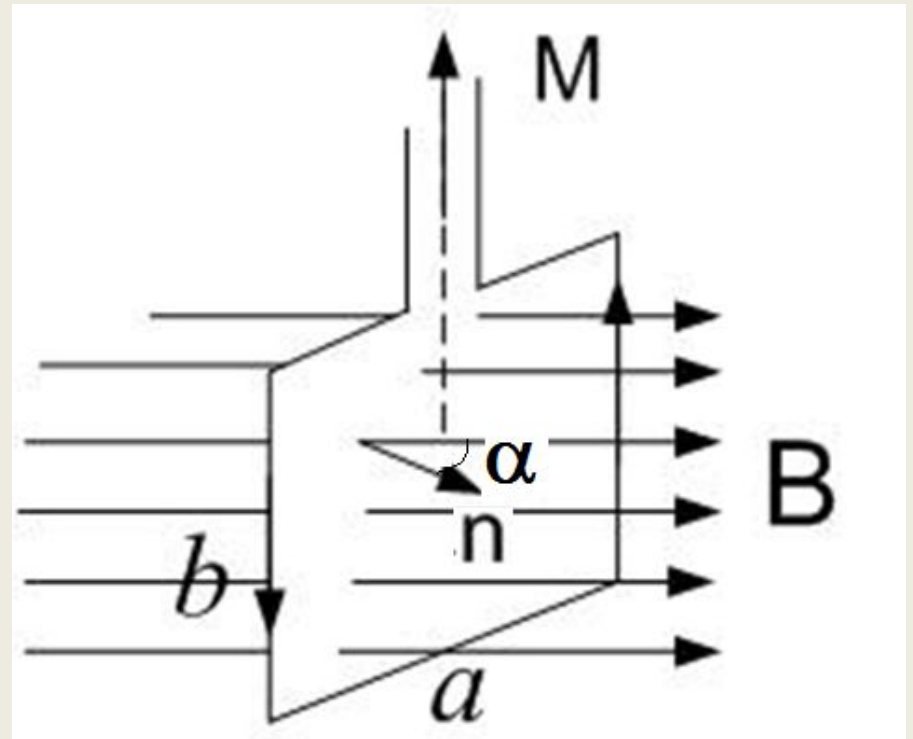
$$\delta A = Md\alpha = Id\Phi$$

$$\Phi = SB\cos\alpha$$

$$d\Phi = ISB\sin\alpha d\alpha$$

$$Md\alpha = ISB\sin\alpha d\alpha$$

$$M = ISB\sin\alpha$$



$$p_m = IS \quad \vec{p}_m = IS\vec{n};$$

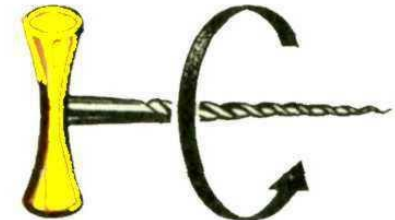
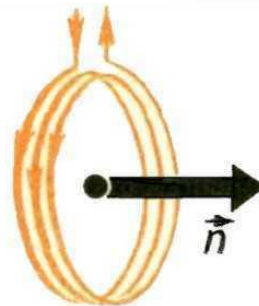
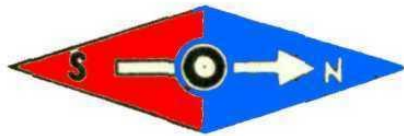
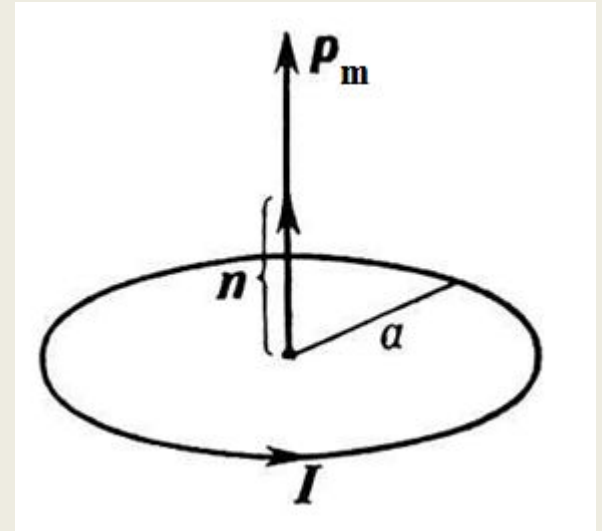
$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$$

$\vec{M}$  - момент сил, действующий на виток с током в магнитном поле.

# МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ КОНТУРА С ТОКОМ

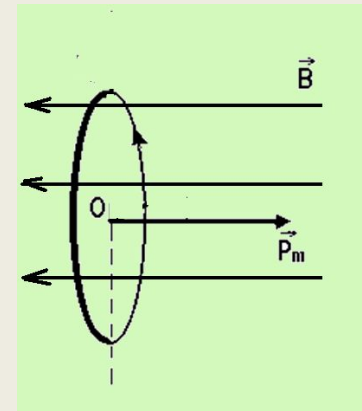
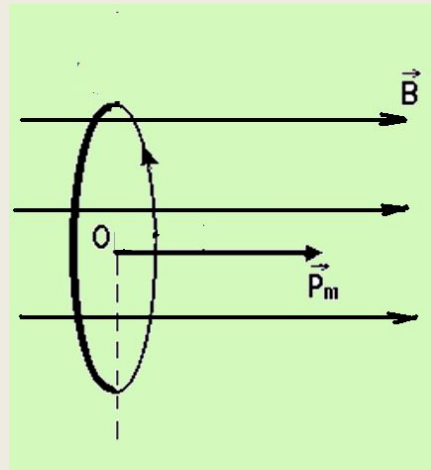
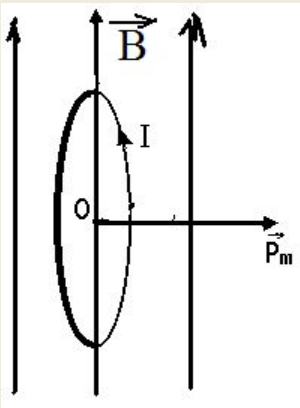
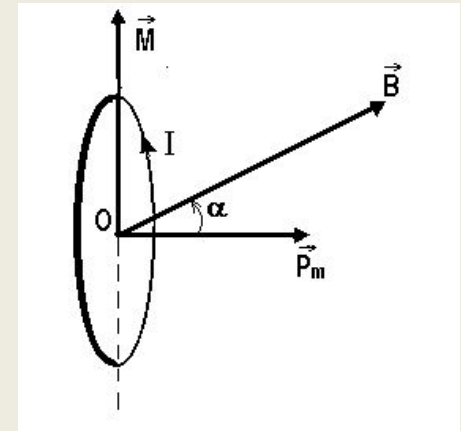
$$\vec{p}_m = IS\vec{n}; \quad p_m = IS;$$

$$[p_m] = 1 \cdot 2.$$



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

$$M = p_m B \sin \alpha$$



$$M_{max} = p_m B$$

$$\alpha = 0$$

$$\vec{p}_m \uparrow \uparrow \vec{B}$$

$$M = 0$$

$$\alpha = \pi$$

$$\vec{p}_m \downarrow \uparrow \vec{B}$$

$$M = 0$$