

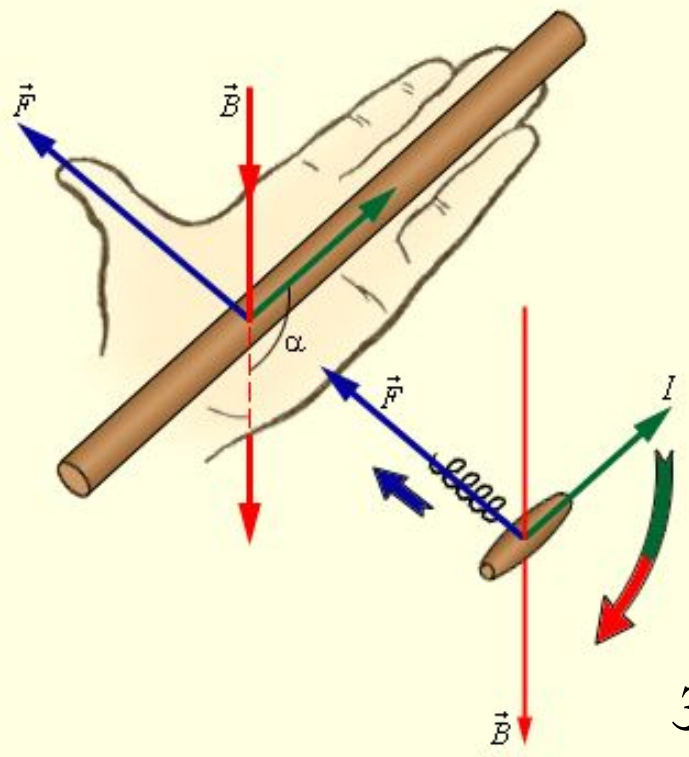
Лекция 2

СИЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вопросы:

- 1. Проводник с током в магнитном поле.
Сила Ампера.**
- 2. Движение заряженных частиц в
магнитном поле. Сила Лоренца.
Эффект Холла.**
- 3. Вихревой характер магнитного поля.**

Действие магнитного поля на проводник с током



Сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током, называется *силой Ампера*.

Направление силы Ампера определяется либо с помощью правила левой руки, либо с помощью правила буравчика (правого винта).

Закон Ампера:

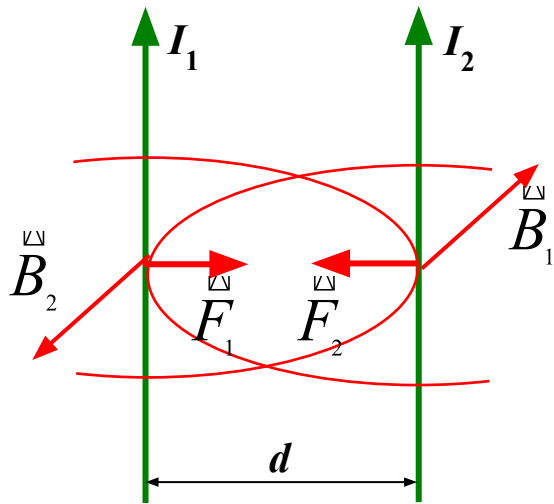
$$dF = I \left[dl \times B \right]$$

Закон Ампера в скалярной форме:

$$dF = I \cdot dl \cdot B \cdot \sin(\overset{\sphericalangle}{dl}, \overset{\sphericalangle}{B}) = I \cdot dl \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Если проводник с током прямолинейный и магнитное поле однородно ($B = const.$), то $F = BIl \sin \alpha$.

Взаимодействие параллельных проводников с током



По закону Био-Савара-Лапласа:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d} \quad B_2 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_2}{d}$$

По закону Ампера:

$$dF_2 = B_1 I_2 dl = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 dl}{d} = dF_1$$

При $l_1 = l_2 \equiv l$

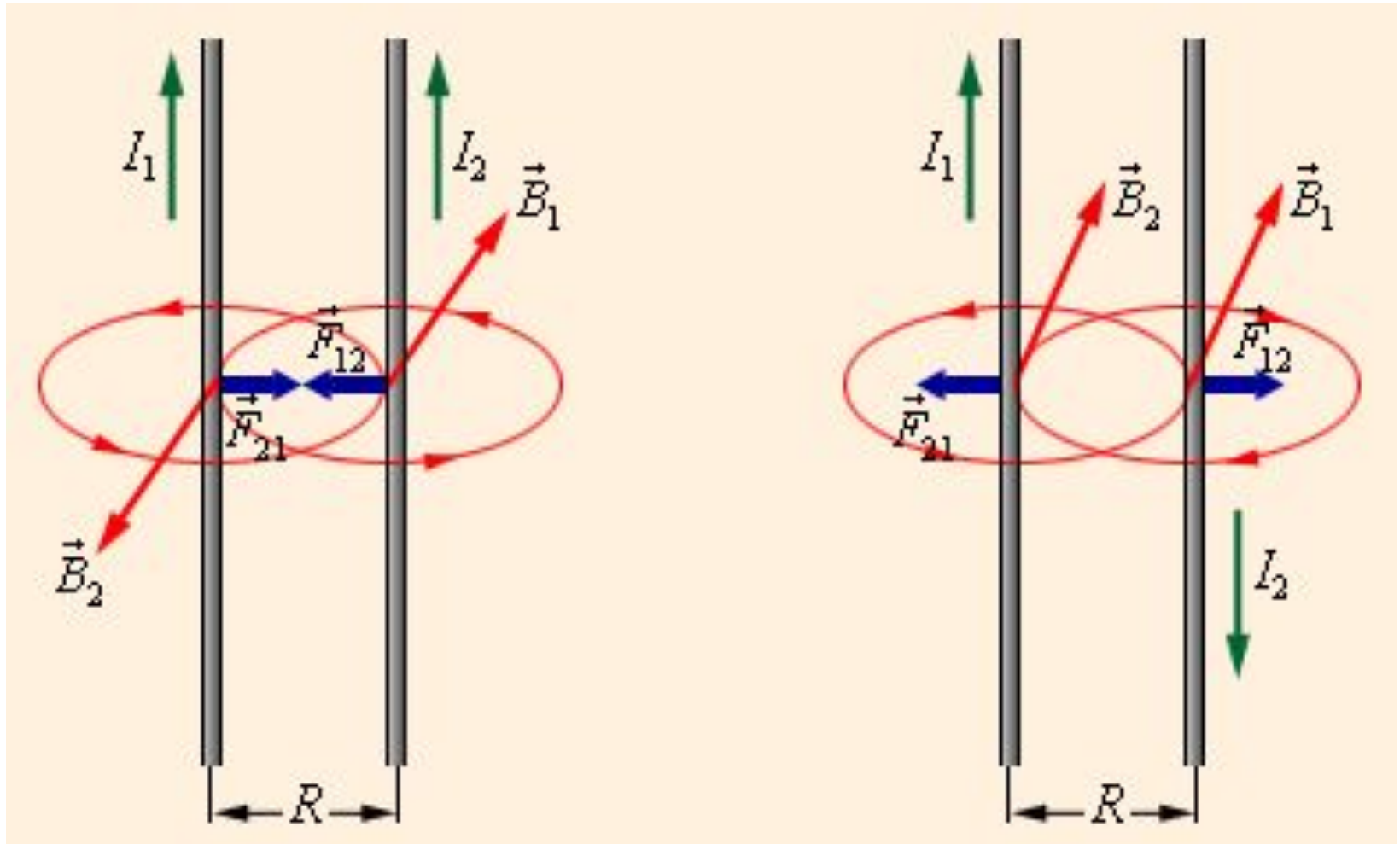
и $F_1 = F_2 \equiv F$:

$$F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

$l \gg d$

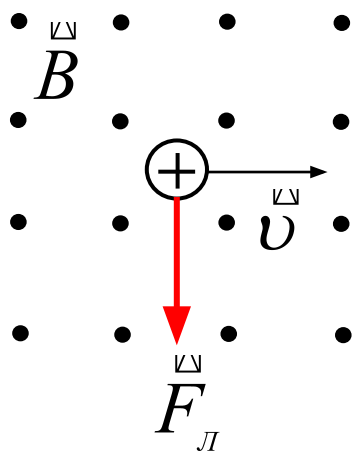
Параллельные проводники с током взаимодействуют с силами, пропорциональными произведению токов и обратно пропорциональными расстоянию между ними.

Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов



Параллельные проводники с токами одинакового направления притягиваются, а с токами противоположного направления – отталкиваются.

Действие магнитного поля на движущийся заряд



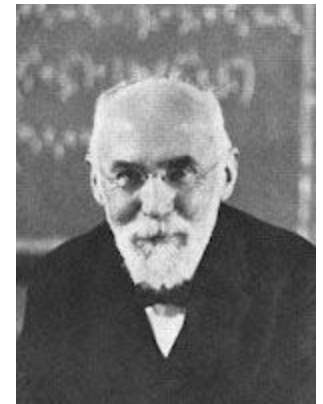
Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд, называется *силой Лоренца*.

Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, определяется с помощью правила левой руки.

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad F_L = qvB \sin \alpha$$

Сила Лоренца:

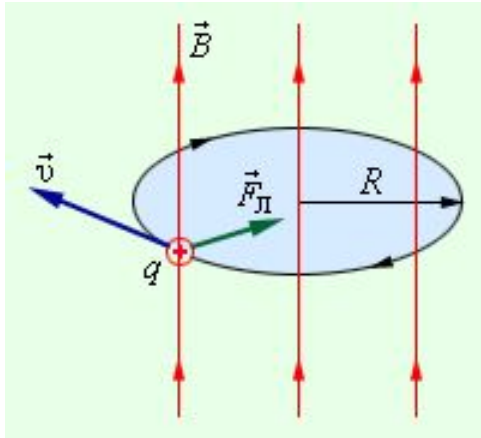
- не действует на незаряженную или покоящуюся частицу;
- не действует на частицу, движущуюся вдоль линий магнитной индукции ($\alpha = 0$ или π);
- не совершает работы, следовательно, не изменяет модуль скорости (кинетическую энергию).



Хендрик Лоренц
(1853 – 1928)

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

1. Частица движется вдоль линий магнитной индукции ($\alpha = 0$ или π ; $F_{\perp} = 0$). *Движение прямолинейное и равномерное.*



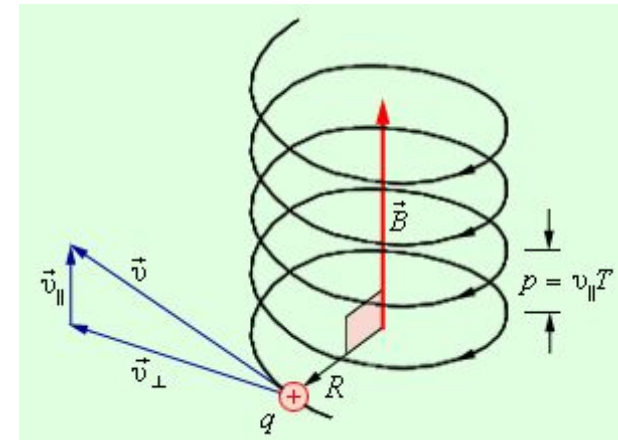
2. Частица движется перпендикулярно линиям индукции ($\alpha = \pi/2$ и $F_{\parallel} = qvB$)

Движение равномерное, по окружности.

$$\frac{mv^2}{R} = qvB \Rightarrow R = \frac{mv}{qB} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

3. Частица движется под углом α к линиям магнитной индукции. *Движение по винтовой линии.*

$$R = \frac{mv}{qB} \cdot \sin \alpha \quad p = \frac{2\pi m v}{qB} \cdot \cos \alpha$$



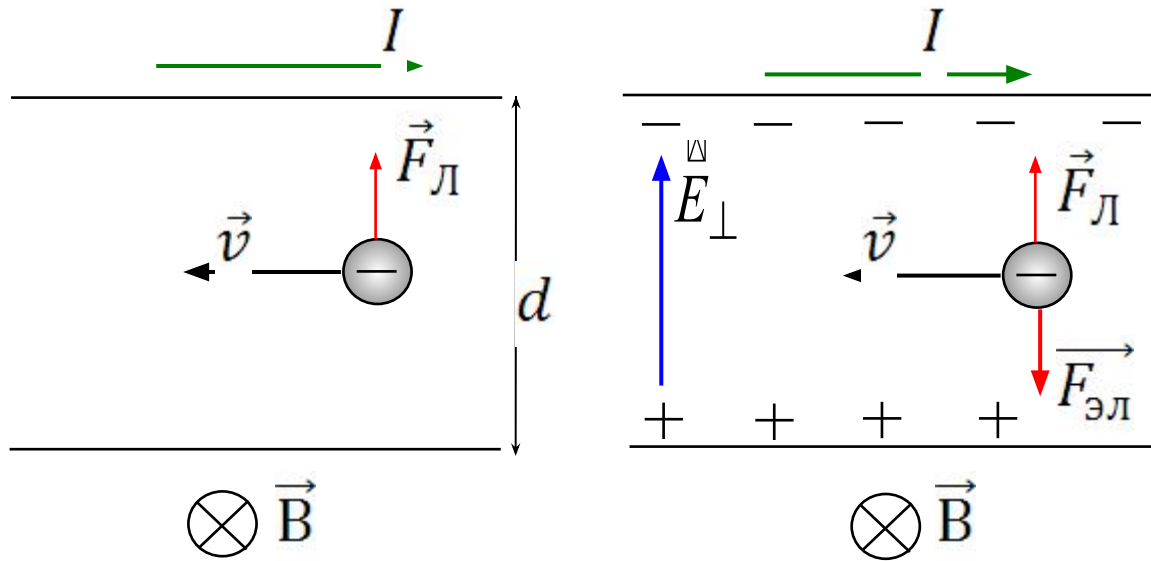
Если на движущуюся заряженную частицу одновременно действуют электрическое поле напряженностью \vec{E} и магнитное поле с индукцией \vec{B} , то результирующая сила равна:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]) \quad \text{– обобщенная сила Лоренца.}$$

Электрическая составляющая обобщенной силы Лоренца изменяет модуль скорости (кинетическую энергию) движущейся заряженной частицы, а магнитная составляющая – только направление ее движения.

Действие силы Лоренца лежит в основе работы масс-спектрографов и управления движением заряженных частиц в современных ускорителях (циклотронах, синхрофазотронах и т.д.)

Эффект Холла (обнаружен в 1879 г.)

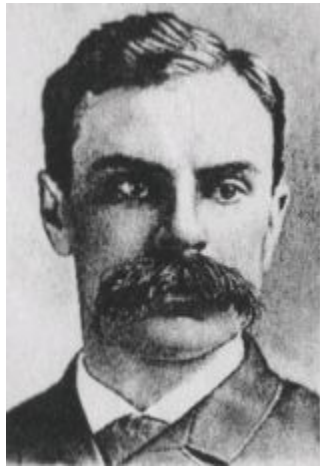


Эффект Холла – это возникновение поперечной разности потенциалов в проводнике с током, помещенном в магнитное поле.

Под действием силы Лоренца возникает разделение зарядов на противоположных гранях проводника и образуется поперечное электрическое поле.

$$F_{\text{Л}} = F_{\text{эл}} \Rightarrow evB = eE_{\perp} \Rightarrow E_{\perp} = vB$$

$$U = E_{\perp}d = vBd = \frac{BId}{enS} \quad \text{– холловская разность потенциалов.}$$



Эдвин Герберт Холл
(1855 – 1938)

Постоянная Холла

$$U = R_H \cdot B j d,$$

где $R_H = \frac{1}{ne}$ – *постоянная Холла.*

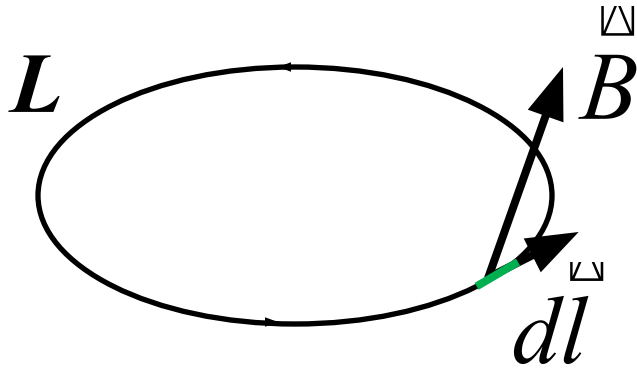
Измерив постоянную Холла, можно найти концентрацию носителей тока в данном металле.

Применение эффекта Холла:

- МГД-генераторы;
- датчики магнитного поля;
- исследование свойств полупроводников.



Циркуляция вектора магнитной индукции



L – произвольный замкнутый контур.

$$\Gamma_B = \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

– циркуляция вектора магнитной индукции.

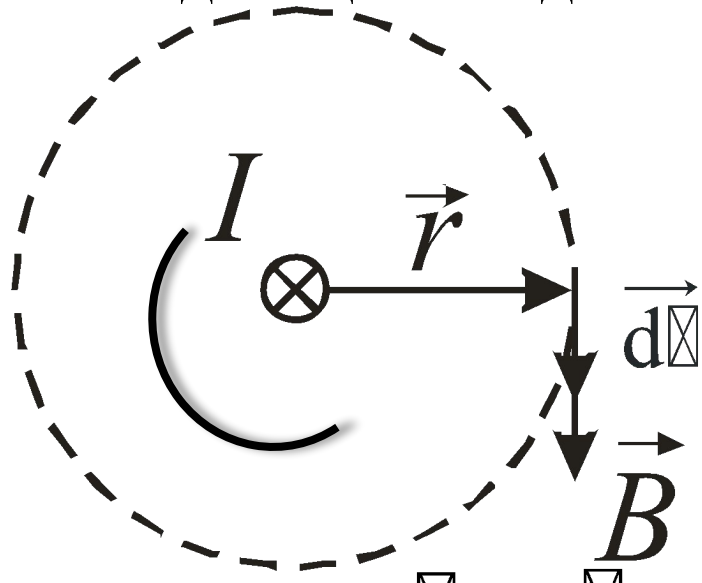
Если для электростатического поля всегда:

$$\Gamma_E = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0,$$

то для магнитного поля в общем случае:

$$\Gamma_B = \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} \neq 0 \quad (\text{вихревое поле})$$

Пример: вычислим циркуляцию вектора \vec{B} для прямолинейного проводника с током в вакууме вдоль контура, совпадающего с одной из магнитно-силовых линий.



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

$$\vec{B} \cdot \vec{dl} = B \cdot dl$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot \vec{dl} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} \cdot \int_0^{2\pi r} dl = \mu_0 I$$

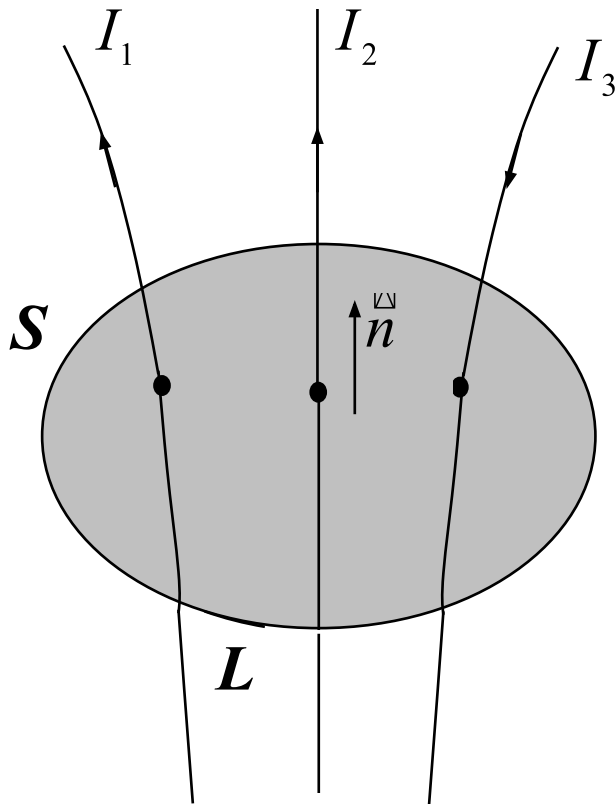
Этот результат справедлив не только для кругового контура, но и для замкнутого контура любой геометрической формы.

Закон полного тока в вакууме

Если контур охватывает несколько токов, то справедлив принцип суперпозиции:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_i I_i$$

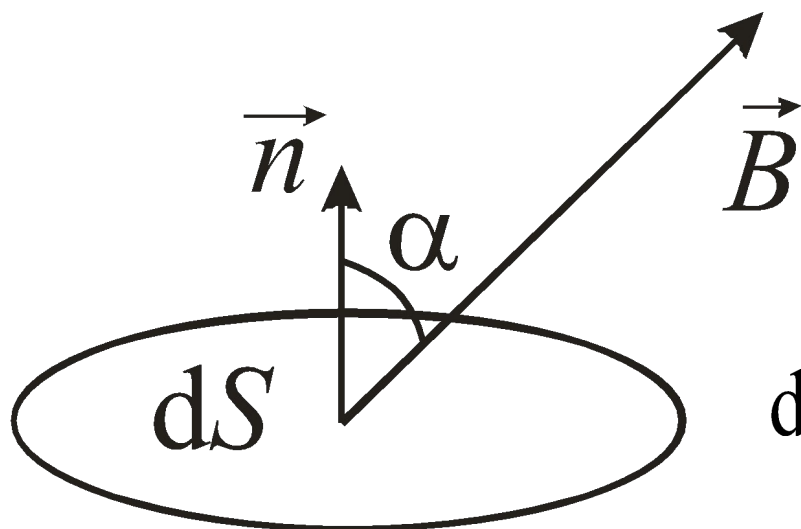
Закон полного тока в вакууме:
циркуляция вектора магнитной индукции в вакууме равна произведению магнитной постоянной на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром.



Например, для схемы, показанной на рисунке:

$$\Gamma_B = \mu_0 \cdot (I_1 + I_2 - I_3)$$

Магнитный поток



Магнитным потоком через площадку dS называется скалярная физическая величина

$$d\hat{O}_B = \vec{B} \cdot \vec{n} dS = B \cos \alpha dS = B_n dS$$

$$\hat{O}_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \int_S B_n dS \quad \text{— магнитный поток через}$$

Для однородного поля и плоской площадки

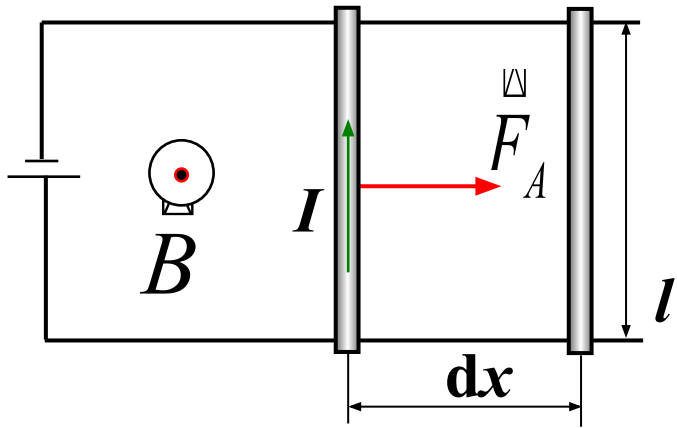
конечную площадку.

$$\boxed{\Phi_B = BS \cdot \cos \alpha}$$

$$[\Phi_B] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$$

$$\hat{O}_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{— теорема Гаусса для магнитного поля.}$$

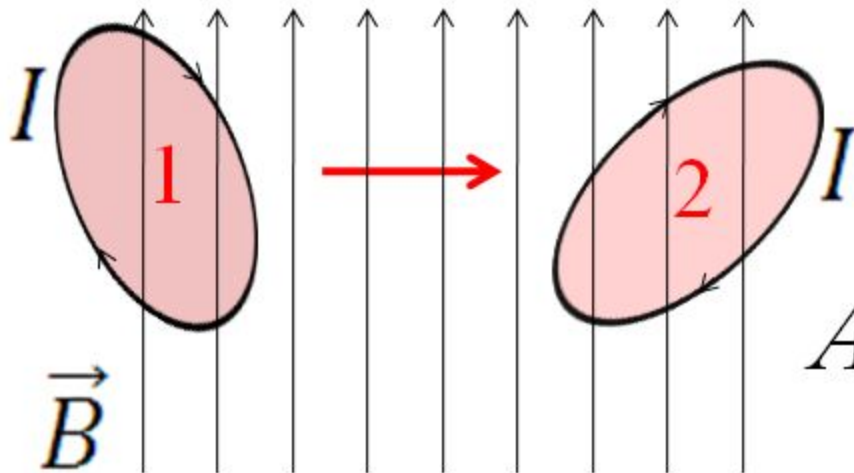
Работа по перемещению проводника
и контура с током в магнитном поле



$$F_A = I \cdot B \cdot l - \text{сила Ампера.}$$

$$dA = F_A dx = I B l dx = I B dS = I d\hat{O}$$

$$A = \int_1^2 I d\hat{O} = I \Delta \hat{O}$$



$$A = I \cdot \Delta \Phi = I \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)$$