



З Д Р А В С Т В У Й Т Е !

## 15.4. Напряженность магнитного поля.

Итак, мы с вами выяснили, что магнитное поле – это одна из форм проявления электромагнитного поля, особенностью которого является то, что это поле действует только на движущиеся частицы и тела, обладающие электрическим зарядом, а также на намагниченные тела.

Магнитное поле создается проводником с током, движущимися электрическими заряженными частицами и телами, а так же переменными электрическими полями.

Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции  $\vec{\mathbf{B}}$ , определяемый по формуле:

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{r}}]}{r^3} \quad (15.4.1)$$

для одного заряда в вакууме.

Еще одной характеристикой магнитного поля является *напряженность*.

*Напряженностью магнитного поля называют векторную величину  $\vec{H}$ , характеризующую магнитное поле и определяемую следующим образом:*

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (15.4.2)$$

Тогда напряженность магнитного поля заряда  $q$ , движущегося в вакууме равна:

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3} \quad (15.4.3)$$

Это выражение показывает закон Био-Савара-Лапласа для  $\vec{H}$ .

Напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  является как бы аналогом электрического смещения  $\vec{D}$  в электростатике.

## 15.5. Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции

Итак мы с вами говорили, что в природе нет магнитных зарядов. В свое время Дирак высказал предположение о существовании магнитных зарядов (названные монополии Дирака). Однако до сих пор они не найдены. Это приводит к тому, что линии вектора

**В** не имеют ни начала ни конца. А как же поток вектора через поверхность? Мы знаем, что поток любого вектора  $\Phi = N_{нач.} - N_{оканч.}$ , т.е. разность числа линий начинающихся у поверхности и числа линий заканчивающихся внутри поверхности.

В соответствии с вышеизложенным, можно сделать заключение, что поток вектора **В** через замкнутую поверхность должен быть равен нулю. Таким образом для любого магнитного поля и произвольной замкнутой поверхности  $S$  имеет место условие:

$$\Phi_B = \oint_S B dS = 0 \quad (15.5.1)$$

Это теорема Гаусса для  $\Phi_B$  (в интегральной форме): *поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.*

Этот результат является математическим выражением того, что в природе нет магнитных зарядов — источников магнитного поля на которых начинались бы и заканчивались линии магнитной индукции.

Заменяя поверхностный интеграл в (15.5.1) объемным, получим:

$$\int \nabla B dV = 0 \quad (15.5.2)$$

Это условие должно выполняться для любого произвольного объема  $V$ , а это в свою очередь возможно, если подынтегральная функция в каждой точке поля равна нулю. *Таким образом магнитное поле обладает тем свойством, что его дивергенция всюду равна нулю*

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad \text{или} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (15.5.3)$$

В этом его отличие от электростатического поля, которое является потенциальным и может быть выражено скалярным потенциалом  $\varphi$ , **магнитное поле – вихревое, или соленоидальное.**

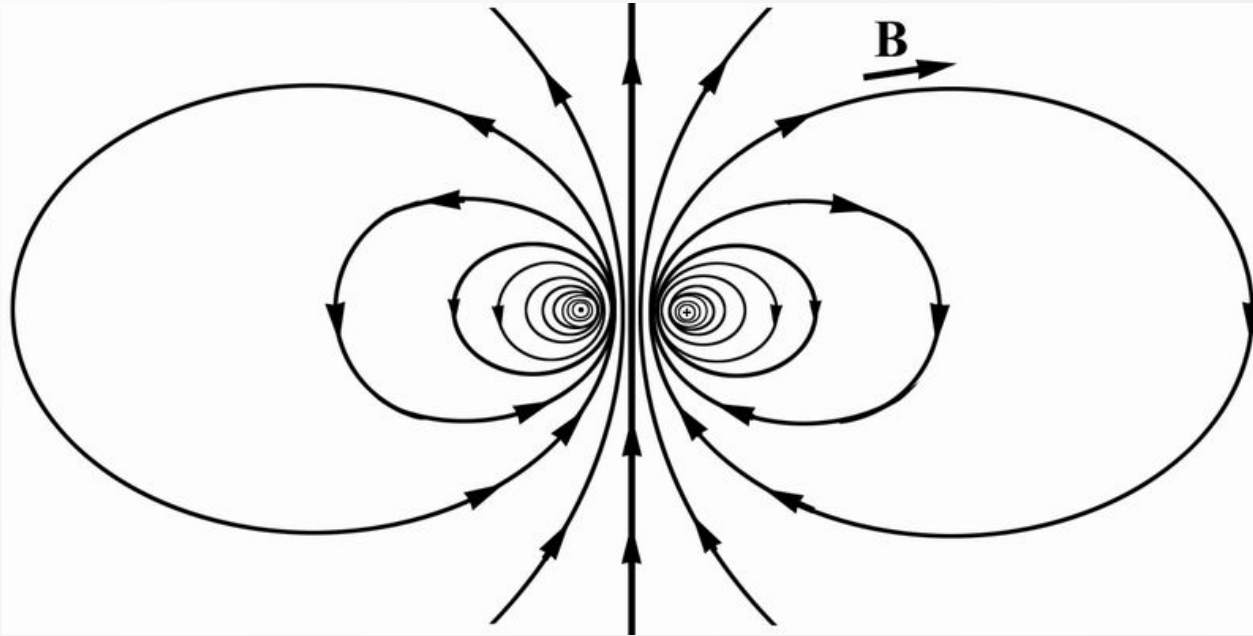


Рис. 15.8. Магнитное поле  $B$ , создаваемое зарядом, движущимся по круговому контуру

Сегодня: \*

# Лекция 16

## **Тема: СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

### **Содержание лекции:**

**16.1. Закон Ампера;**

**16.2. Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током;**

**16.3. Воздействие магнитного поля на рамку с током;**

**16.4. Единицы измерения магнитных величин;**

**16.5. Сила Лоренца;**

**16.6. Эффект Холла;**

**16.7. Циркуляция вектора магнитной индукции.**

**16.8. Магнитное поле соленоида;**

**16.9. Магнитное поле тороида.**

## **16.1. Закон Ампера**

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

$$F = k \frac{I_1 I_2}{b} \quad (16.1.1)$$

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

В первоначальное выражение закона Ампера не входила никакая величина характеризующая магнитное поле. Потом разобрались,



что взаимодействие токов осуществляется через магнитное поле и следовательно в закон должна входить характеристика магнитного поля.

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

$$d\mathbf{F} = I [d\mathbf{l}, \mathbf{B}] \quad (16.1.2)$$

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

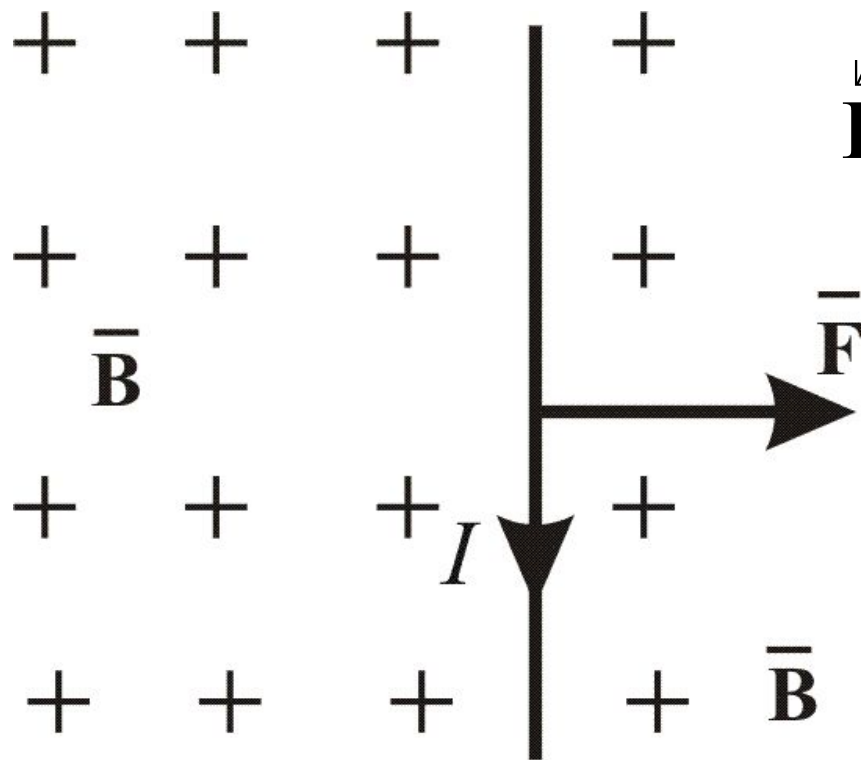
Модуль силы действующей на проводник

$$dF = IBdl \sin(\angle d\mathbf{l}, \mathbf{B}). \quad (16.1.3)$$

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

$$F = IB, \quad (16.1.4)$$

где  $I = qnv_{dr} S$  – ток через проводник сечением  $S$ .



$\nabla$   $\vec{F}$  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.

Рис. 16.1

Закон Ампера – это первое открытие фундаментальных сил, зависящих от скоростей. *Сила зависящая от движения!*  
 Такого еще не было.

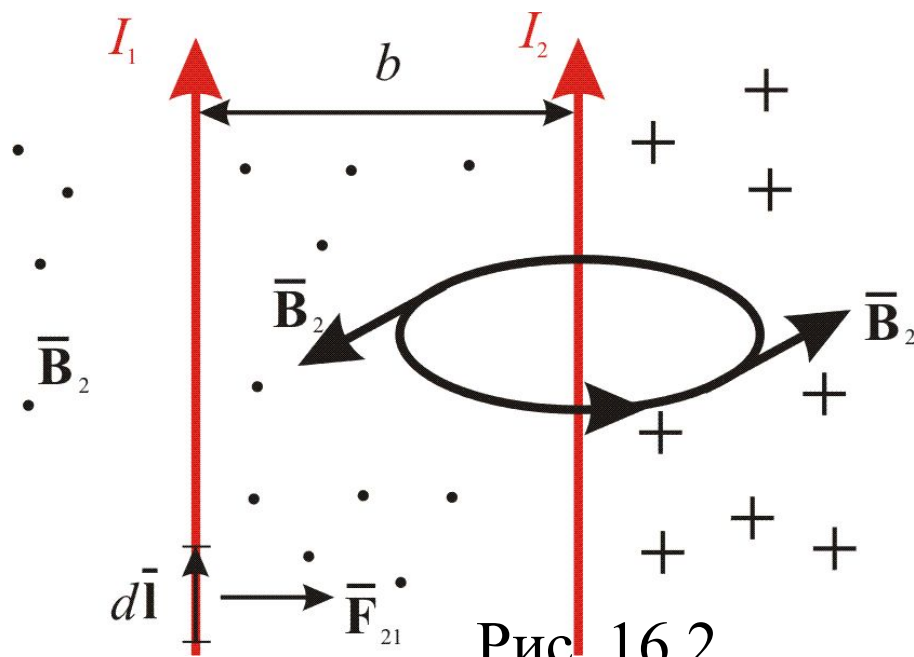
## 16.2. Взаимодействие двух параллельных бесконечных проводников с током

Пусть  $b$  – расстояние между проводниками. Задачу следует решать так: один из проводников  $I_2$  создаёт магнитное поле, второй  $I_1$  находится в этом поле.

Магнитная индукция, создаваемая током  $I_2$  на расстоянии  $b$  от него:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi b} \quad (16.2.1)$$

Если  $I_1$  и  $I_2$  лежат в одной плоскости, то угол между  $B_2$  и  $I_1$  прямой, следовательно



$\sin(\vec{\Gamma}, \vec{B}) = 1$  тогда, сила, действующая на элемент тока  $I_1 dl$

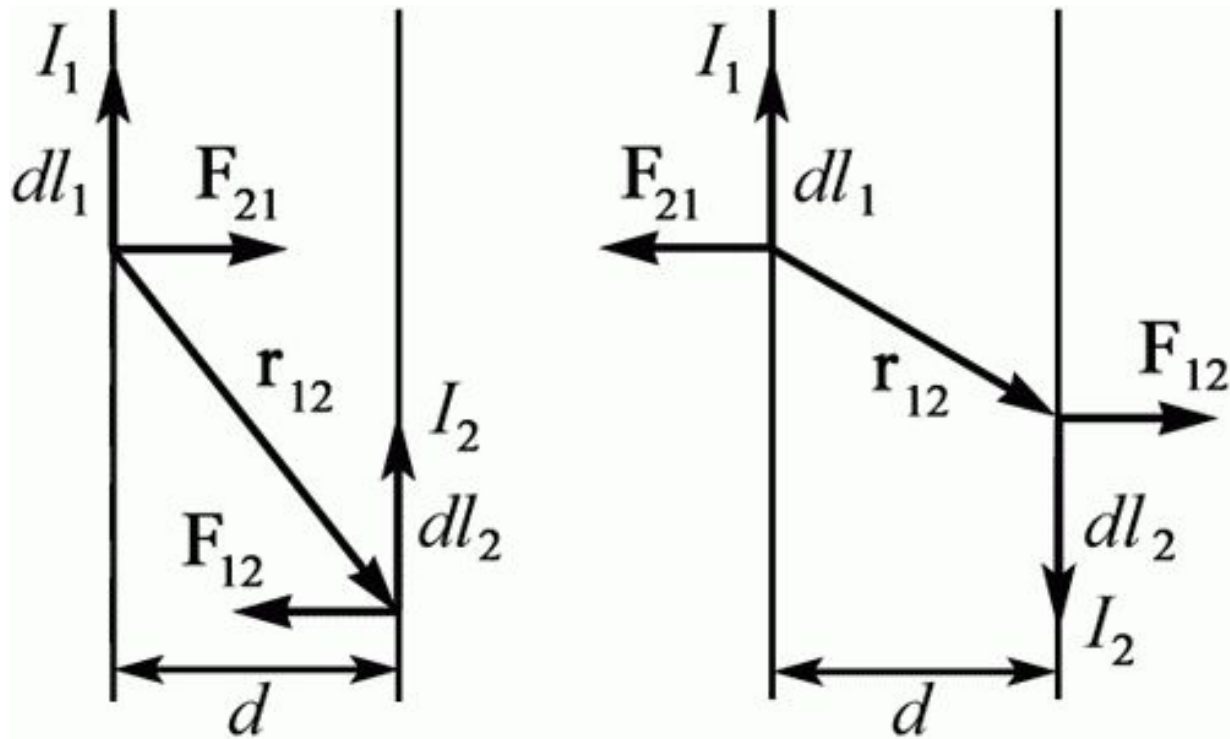
$$F_{21} = B_2 I_1 dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2 dl}{2\pi b}. \quad (16.2.2)$$

На каждую единицу длины проводника действует сила

$$F_{21ed} = \frac{F_{21}}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \quad (16.2.3)$$

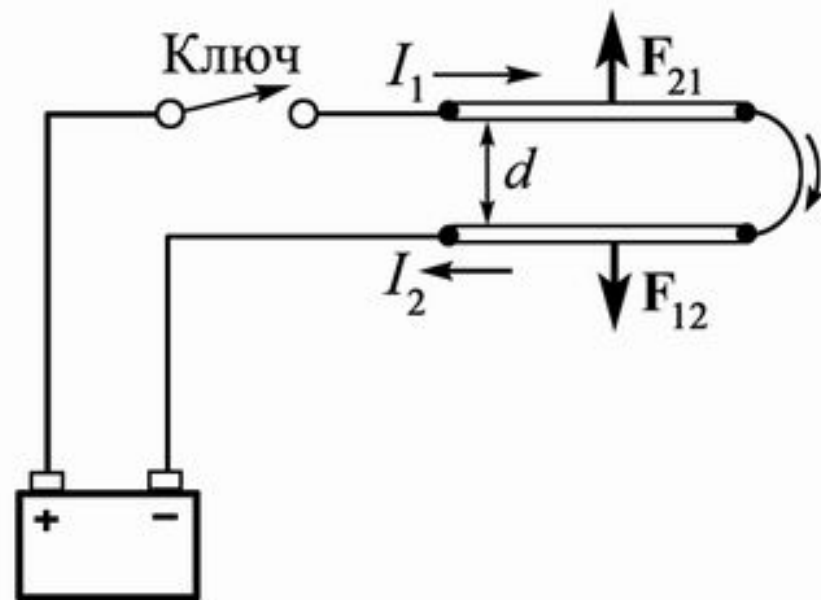
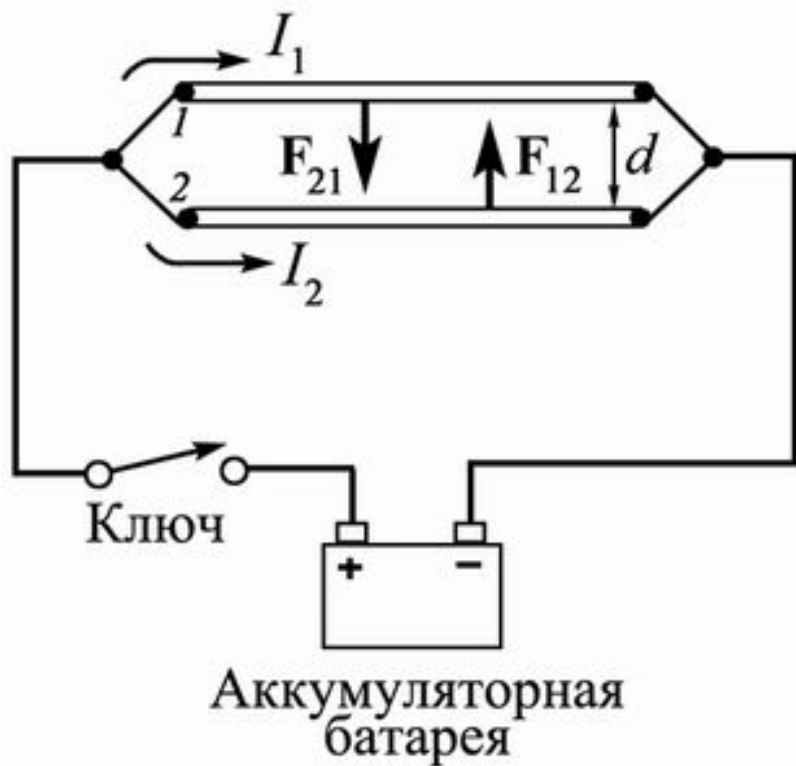
(разумеется, со стороны первого проводника на второй действует точно такая же сила).

Результирующая сила равна одной из этих сил! Если эти два проводника будут воздействовать на третий, тогда их магнитные поля нужно сложить **векторно!!!**.



Взаимодействие бесконечно малых элементов  $dl_1$ ,  $dl_2$  параллельных токов  $I_1$  и  $I_2$ :

- токи, текущие в одном направлении притягиваются;**
- токи, текущие в разных направлениях, отталкиваются**



Близко расположенные два незаряженных проводника при включении батареи **притягиваются (а)** или **отталкиваются (б)** в зависимости от того, текут ли в них токи в одном или противоположном направлениях.

По величине силы отталкивания или притяжения, действующей на единицу длины проводника, можно определить силу тока, идущего по проводникам.

При  $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$ ,  $d = 1 \text{ м}$   $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$

$$\frac{F}{l} = \frac{F_{1 \rightarrow 2}}{l} = \frac{F_{2 \rightarrow 1}}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Силе неизменяющегося тока в 1 ампер соответствует ток, при прохождении которого по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии одного метра, соответствует сила магнитного взаимодействия на каждый метр длины проводников, равная  **$2 \cdot 10^{-7}$  Н.**

Таким образом, на основе закона Ампера устанавливается эталон единицы силы тока в СИ.

## 16.3. Воздействие магнитного поля на рамку с током

Рамка с током  $I$  находится в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ ,  $\alpha$  — угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$  (направление нормали связано с направлением тока правилом буравчика).

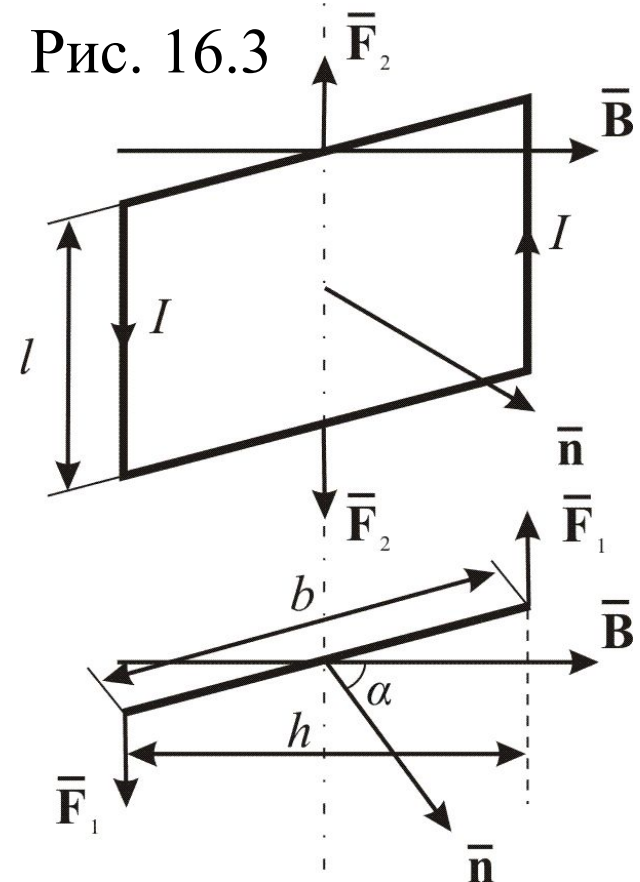
Сила Ампера действующая на сторону рамки длиной  $l$  равна:

$$\vec{F}_1 = I\vec{l} \times \vec{B} \quad (\vec{B} \perp \vec{l})$$

На другую сторону длиной  $l$  действует такая же сила. Получается «пара сил» или «вращающий момент».

$$M = F_1 h = IlBbsin\alpha, \quad (16.3.1)$$

где плечо  $h = bsin\alpha$ . Так как  $lb = S$  — площадь рамки, тогда можно записать





$$M = IBs \sin \alpha = P_m \sin \alpha. \quad (16.3.2)$$

Вот откуда мы писали с вами выражение для магнитной индукции:

$$B = \frac{M}{P_m \sin \alpha} \quad \text{или} \quad B = \frac{M_{\text{макс}}}{P_m} \quad (16.3.3)$$

где  $M$  – вращающий момент силы,  $P$  – магнитный момент.

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

$$B = \frac{F}{I \cdot l}; \quad \text{Размерность индукции } [B] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Итак, под действием этого вращательного момента рамка повернется так, что  $\vec{n} \parallel \vec{B}$ . На стороны длиной  $b$  тоже действует сила Ампера  $F_2$  – растягивает рамку и так как силы равны по величине и противоположны по направлению рамка не смещается, в этом случае  $M = 0$ , состояние устойчивого равновесия

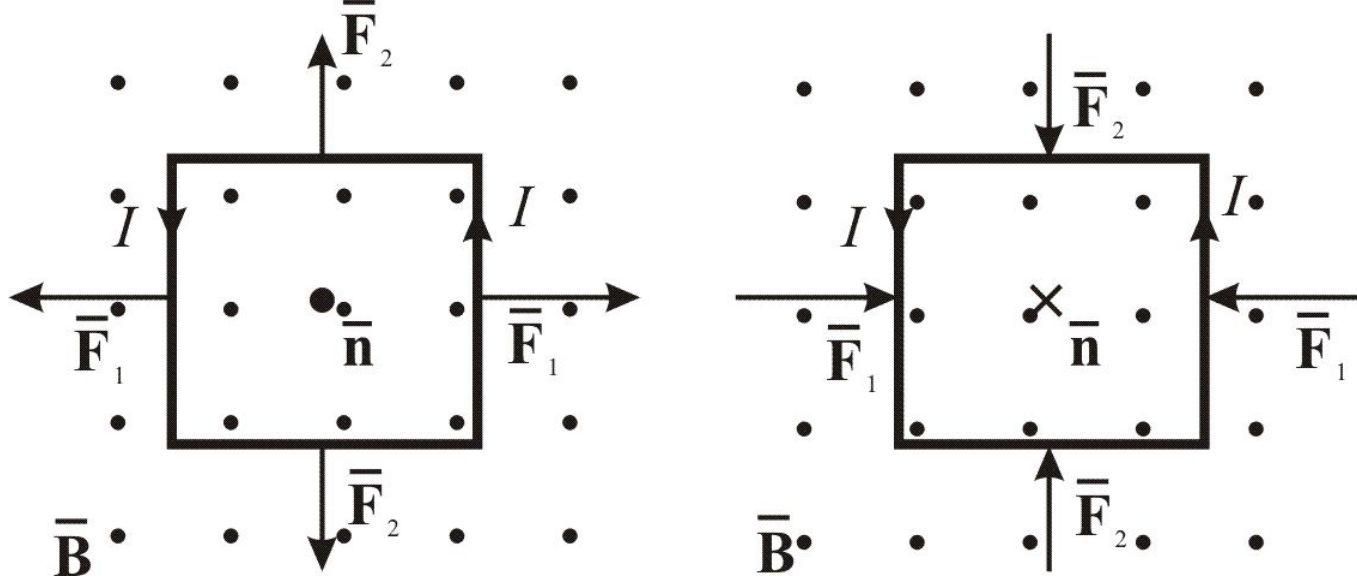


Рис. 16.4

Когда  $\vec{n}$  и  $\vec{B}$  антипараллельны,  $M = 0$  (так как плечо равно нулю), это состояние, неустойчивого равновесия. Рамка сжимается и, если чуть сместится, сразу возникает вращающий момент такой что она повернется так, что  $\vec{n} \parallel \vec{B}$  (рис. 16.4).

В неоднородном поле рамка повернется и будет втягиваться в область более сильного поля

## 16.4. Единицы измерения магнитных величин

Как вы догадываетесь, именно закон Ампера используется для установления единицы силы тока – ампера [А].

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

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{b} \quad (16.4.1)$$

где  $dl = 1 \text{ м}$ ;  $b = 1 \text{ м}$ ;  $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$ ;  $\frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{Н}{м}$

Определим отсюда размерность и величину :

$$\text{В СИ: } 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 2A^2 \Rightarrow \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \text{ или } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$\text{В СГС: } \mu_0 = 1$$

Из закона Био-Савара-Лапласа, для прямолинейного проводника с током  $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}$  можно найти размерность индукции магнитного поля:

$$[\text{В}] = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А м}} = 1 \text{ Тл}$$

Один тесла  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ . *Гаусс* – единица измерения в Гауссовой системе единиц (СГС). *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  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Единица измерения названа в честь сербского ученого Николы Тесла (1856 – 1943 г.), имевшего огромное количество изобретений. Другое определение: 1 Тл равен магнитной индукции при которой магнитный поток сквозь площадку  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярную направлению поля равен  $1 \text{ Вб}$ .*

Единица измерения магнитного потока Вб, получила свое название в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804 – 1891 г.) – профессора университетов в Галле, Геттингеме, Лейпциге.

Как мы уже говорили, *магнитный поток  $\Phi$ , через поверхность  $S$  – одна из характеристик магнитного поля* (рис. 16.5)

$$d\Phi_B = B d\mathbf{S} \cos\alpha (\mathbf{dn}, \mathbf{B})$$

$$\Phi = \int_S B_n dS$$

*Единица измерения  $\int_S$  магнитного поток*

$\text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб}$  (вебер), а так как  $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ , то  $1 \text{ Вб} = 10^4 \text{ Гс} \cdot 10^4$

$\text{см}^2 = 10^8 \text{ Мкс}$  Здесь Максвелл (Мкс) – единица измерения

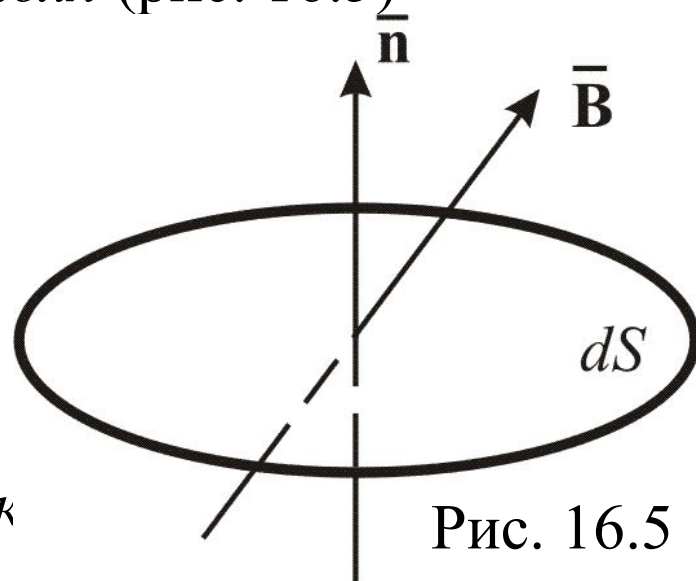


Рис. 16.5

магнитного потока в СГС названа в честь знаменитого ученого Джеймса Максвелла (1831 – 1879 г.), создателя теории электромагнитного поля.

Напряженность магнитного поля  $H$  измеряется в  $\frac{A}{M}$

$$1 \text{ Э} = 79,6 \approx 80 \frac{A}{M} ; \quad 1 \frac{A}{M} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}$$

Сведем в одну таблицу основные характеристики магнитного поля:

Наименование	Обозначение	СИ	СГС	СИ/СГС
Магнитная индукция	$B$	$\text{Тл} \left( \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \right)$	Гс	$10^4$
Напряженность магнитного поля	$H$	А/м	Э	$4\pi \cdot 10^{-3}$
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$\frac{\text{Н}}{\text{А}^2}; \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$	1	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Поток магнитной индукции	$\Phi_B$	Вб (Тл·м <sup>2</sup> )	Макс	$10^8$

**Сегодня: \***

Лекция окончена.

До свидания!

**УРА! УРА! УРА!**



**Сегодня: \***

Лекция окончена.

До свидания!

**УРА! УРА! УРА!**

**Сегодня: \***

Лекция окончена.

До свидания!

**УРА! УРА! УРА!**