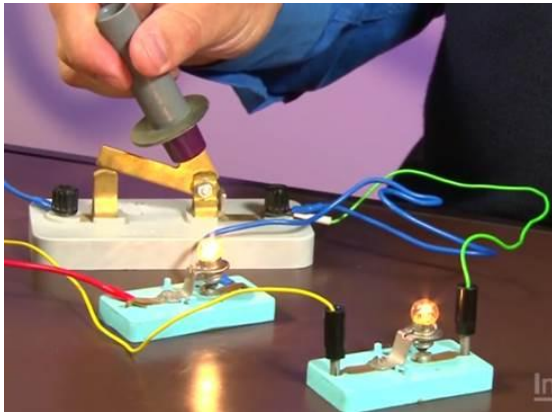


## Лекция 36. Явление электромагнитной индукции



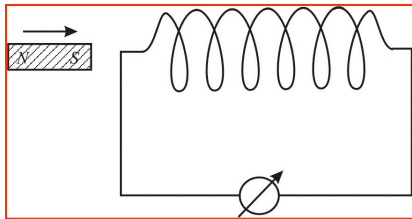
1. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.
2. Явление самоиндукции. Индуктивность. Индуктивность длинного соленоида.
3. Энергия магнитного поля. Плотность энергии.



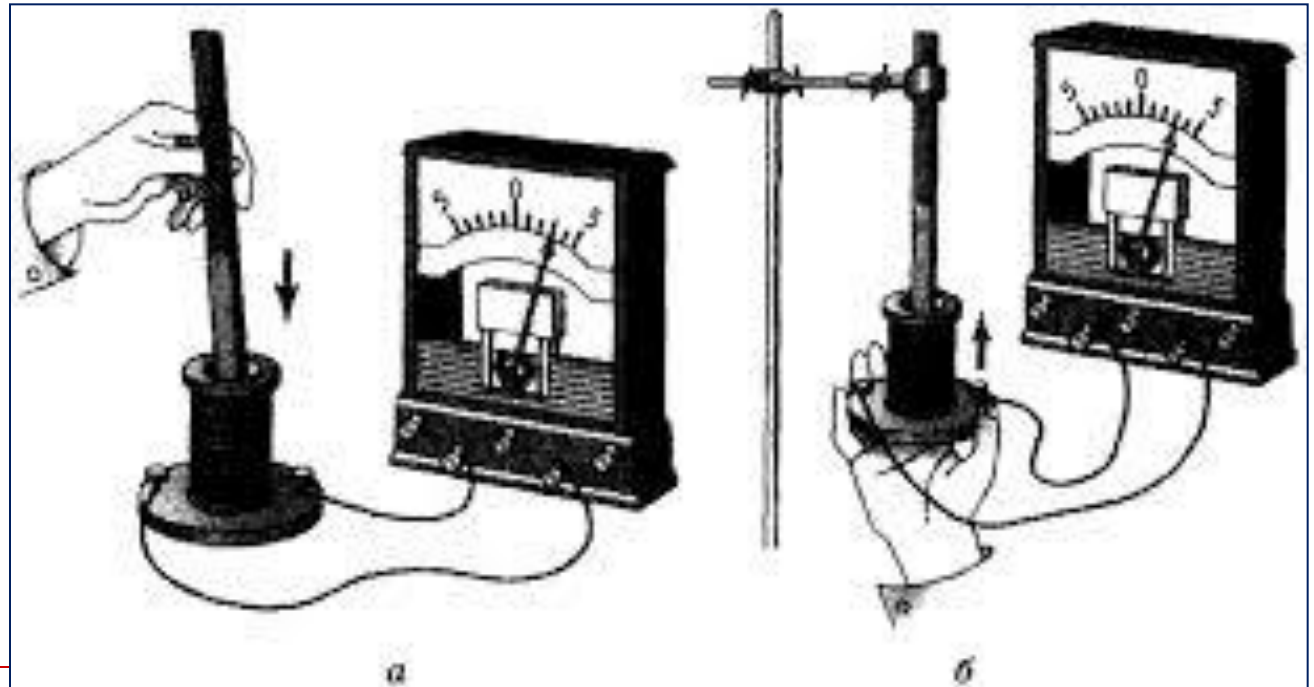
Фарадей Майкл  
(1791 – 1867)

## 1. Внешний вид установки Фарадея

- **Суть опыта 1:** постоянный магнит вводился / выводился в/из соленоид(а), подключенный к амперметру (гальванометру). При этом наблюдался электрический ток в цепи, исчезающий при прекращении движения магнита.
- **Суть опыта 2:** соленоид, подключенный к амперметру (гальванометру) , приближался / удалялся к/от постоянному магниту вводился в. При этом наблюдался электрический ток в цепи, исчезающий при прекращении движения соленоида.
- Направление тока при сближении/ удалении пары «соленоид-магнит» было различным.



Схематическое изображение соленоида (катушки индуктивности) и магнита, вводимого в него



# Закон электромагнитной индукции Фарадея (первичная формула)

- Общим для этих опытов является то, что: если поток вектора индукции  $\Phi_B$ , пронизывающий замкнутый проводящий контур меняется, то в контуре возникает **электрический ток**.
- Это явление называют явлением **электромагнитной индукции**, а ток – **индукционным**.
- **Суть явления:** В замкнутом проводнике, **движущемся** в магнитном поле, возникает индукционный ток.
- **Способы получения индукционного тока:**
  - 1-й способ: перемещение соединенной с гальванометром катушки, в магнитном поле, создаваемом другой катушкой с током.
  - 2-й способ: Ток также появляется при движении катушки с током относительно первой катушки, при внесении сердечника в катушку с током, или вследствие изменения силы тока в ней.
- В обоих этих случаях гальванометр будет показывать наличие индукционного тока за счет **индуцируемой ЭДС**.
- **Закон Фарадея:** ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока  $\Phi_m$  в этом контуре:

$$\mathcal{E}_i = \frac{d\Phi_m}{dt}$$

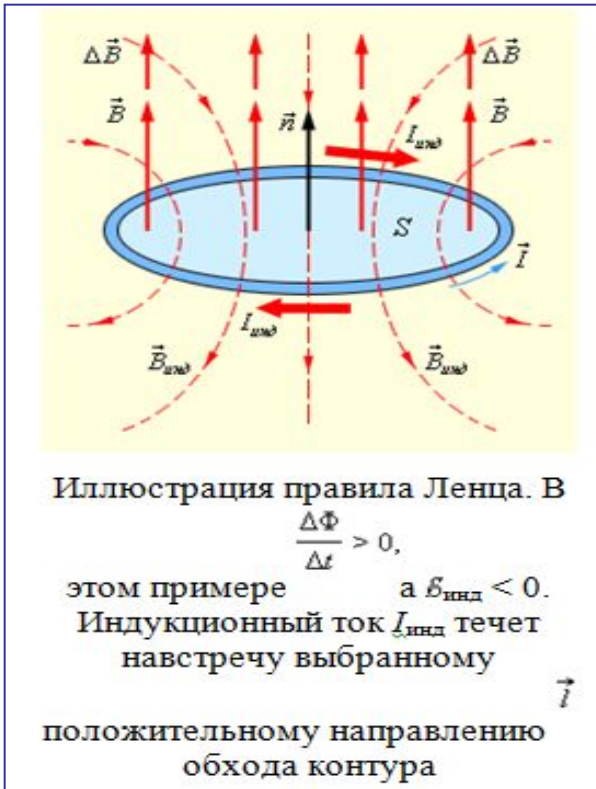
**БЕЗ УКАЗАНИЯ  
ЗНАКА**

где в общем  
случае

$$\Phi_m = \int_S B_n dS$$

- **Вывод из закона Фарадея:** изменяющееся магнитное поле порождает в замкнутом проводнике **ЭДС**, т. е. **электрическое поле**.
- **Вывод:** электрическое поле порождается не только зарядами, но и изменяющимся магнитным полем.
- В данной формулировке **остается открытым вопрос** о знаке производной  $d\Phi/dt$ .

# Закон электромагнитной индукции Фарадея-Ленца



- **Правило Ленца:** направление индукционного тока и, соответственно, знак ЭДС индукции определяются правилом Ленца, которое получено экспериментально: индукционный ток всегда направлен так, чтобы **противодействовать** причине, его вызывающей.
- Другими словами, индукционный ток создает магнитный поток, **препятствующий изменению** магнитного потока, вызывающего ЭДС индукции.

- Правило Ленца выражает важное физическое свойство – **стремление системы противодействовать изменению ее состояния**. Это свойство называют **электромагнитной инерцией**.

- С учетом правила Ленца ЭДС индукции можно записать в виде:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

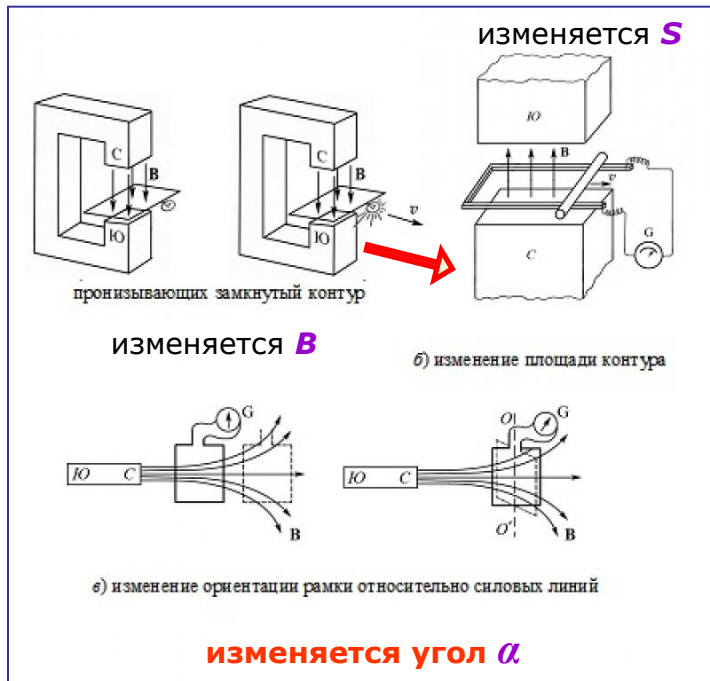
- Это вид **закона электромагнитной индукции Фарадея-Ленца**. 4

# Механизмы появления ЭДС индукции

- ЭДС индукции возникает, когда изменяются  $B$ ,  $S$  или  $\alpha$ :
- Могут изменяться одновременно две или все три характеристики.

$$\mathcal{E}_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} [B \cdot S \cdot \cos \alpha]$$

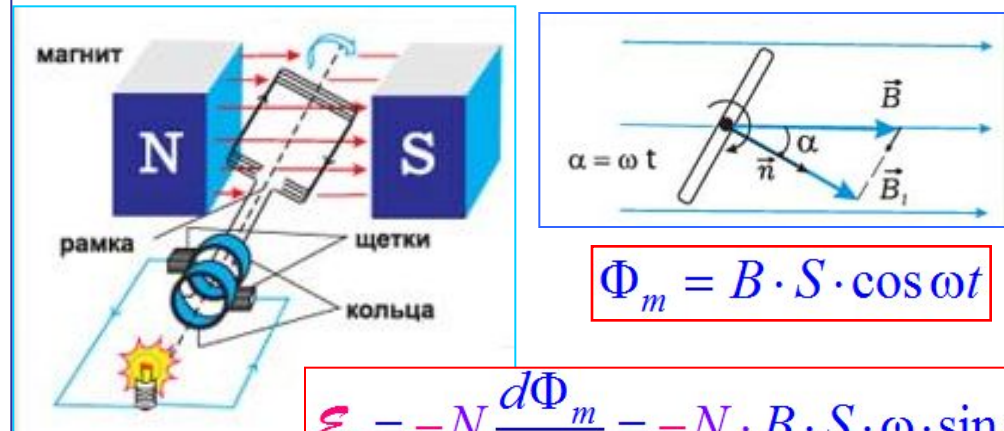
## Примеры 1-3:



## Пример 4:

вращение контура с постоянной угловой скоростью  $\omega$   
– **меняется угол  $\alpha$**

Схема генератора переменного тока



**Вывод из формулы:** ЭДС индукции прямо пропорциональна: а) индукции  $B$ , если она остается постоянной; б) площади  $S$  контура, если она остается постоянной; в) линейной частоте  $\nu$  /циклической частоте  $\omega = 2\pi\nu$ , если она остается постоянной (вращение контура с постоянной угловой скоростью  $\omega$  – **меняется угол  $\alpha$** ); д) количеству витков  $N$  соленоида.

Выводы: ЭДС индукции  
зависит прямо  
пропорционально от:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

1. От количества витков  $N$  в соленоиде:

$$\mathcal{E}_i = k_1 N$$

2. От наличия в соленоиде сердечника:

$$\mathcal{E}_i = \mu k_1 N$$



□ Почему? Индукция  $M$  поля  $B$  связана с силой тока  $I$  отношением:

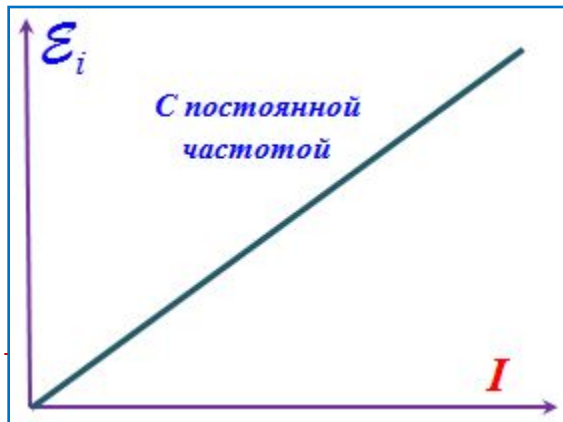
$$B = \mu \mu_0 n I$$



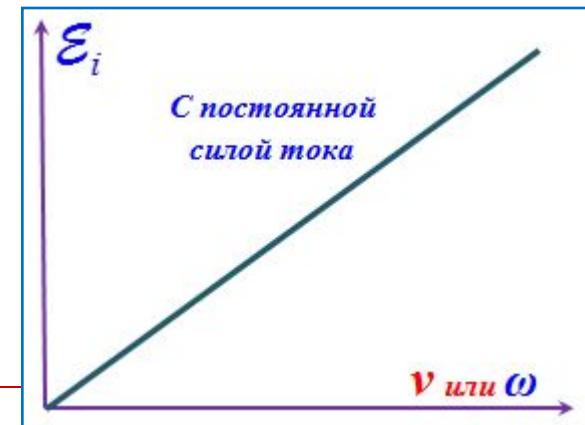
$$\mathcal{E}_i = |N \mu \mu_0 n I S \omega \sin \alpha|$$

по модулю

3. От силы тока  $I$ :



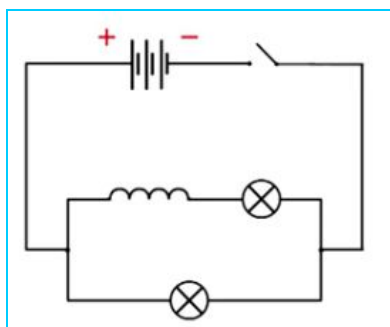
4. От линейной частоты  $\nu$  и круговой частоты  $\omega$



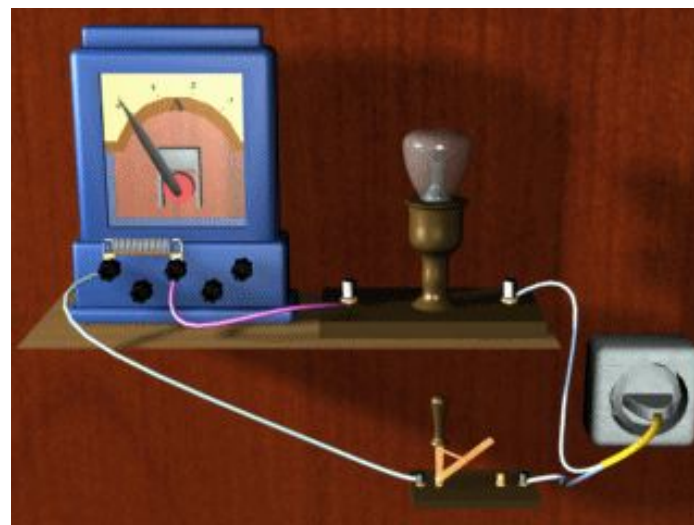
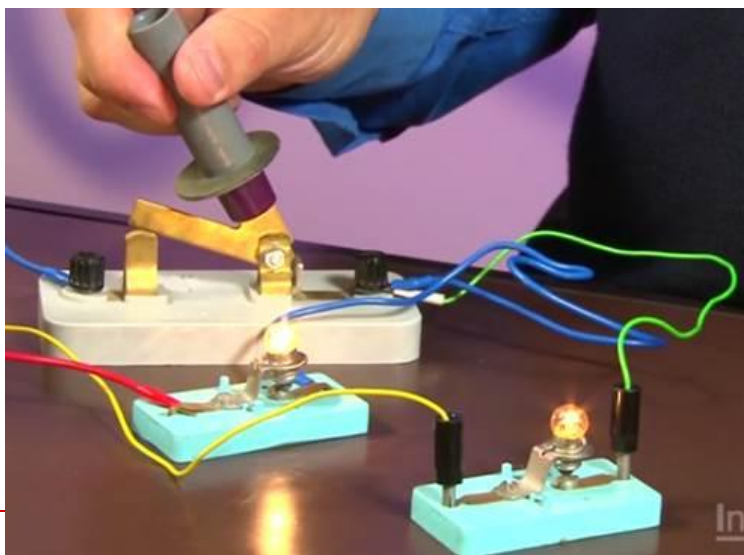


## 2. Формулировка явления самоиндукции

- Ток  $I$ , текущий в любом контуре, создает магнитный поток  $\Psi$ , пронизывающий этот же контур.
- При изменении  $I$  будет изменяться  $\Psi$ , следовательно в контуре будет наводиться ЭДС индукции.



- **Опыт Генри:** электрическая цепь состоит из двух параллельно соединенных лампочек, подключенных через ключ к источнику постоянного тока.
- Последовательно с одной из лампочек подключена катушка.
- После замыкания цепи видно, что лампочка, которая соединена последовательно с катушкой, загорается медленнее, чем вторая лампочка.



Лампочка соединена последовательно с катушкой и **загорается с задержкой**

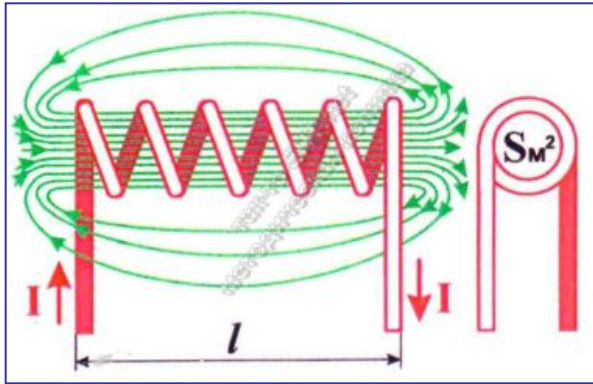
# Потокоцепление и индуктивность

- Если в пространстве, где находится контур с током  $I$ , нет ферромагнетиков, то поле  $B$ , а значит, и полный магнитный поток  $\Psi$  через контур будут пропорциональны силе тока  $I$ , и можно написать:  $\Psi = N\Phi = LI$   
где  $L$  – коэффициент, называемый **индуктивностью** контура.
- **Индуктивность  $L$**  – величина существенно положительная, так как  $\Psi$  и  $I$  всегда имеют одинаковые знаки.
- Вспомним, что полный магнитный поток  $\Psi$  называют **потокоцеплением**.
- Индуктивность  $L$  зависит от формы и размеров контура, а также от магнитных свойств окружающей среды.
- Если контур **жесткий** и поблизости от него нет ферромагнетиков, индуктивность является величиной **постоянной**, не зависящей от силы тока  $I$ .
- Единицей индуктивности является **Генри (Гн)**.
- Индуктивностью **1 Гн** обладает контур, магнитный поток через который при токе **1 А** равен **1 Вб**, значит **1 Гн = 1 Вб/А**.

$$L = \Psi / I$$



## Индуктивность соленоида



- Найдем индуктивность соленоида, пренебрегая краевыми эффектами.
- Пусть  $V$  – объем соленоида,  $n$  – число витков на единицу его длины,  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества внутри соленоида.

$$\Psi = N\Phi = LI$$



$$L = \Psi/I$$

- Задача сводится к тому, чтобы, задавшись током  $I$ , определить потокосцепление  $\Psi$ .
- При токе  $I$  магнитное поле в соленоиде  $B = \mu\mu_0 nI$ .
- Магнитный поток через один виток соленоида  $\Phi_m = \Phi = BS = \mu\mu_0 nIS$ , а полный магнитный поток, пронизывающий  $N$  витков:

$$\Psi = N\Phi = nlBS = \mu\mu_0 n^2 VI$$

где объем соленоида  $V = Sl$ .

- Отсюда индуктивность соленоида:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \mu\mu_0 n^2 V \frac{I}{I} = \mu\mu_0 n^2 V$$

Можно найти размерность для  $\mu_0$  :

$$\mu_0 = \frac{L}{\mu n^2 V} = \frac{L}{\mu V} \left( \frac{l^2}{N^2} \right)$$

где

$$n = \frac{N}{l} = \left[ \frac{1}{\text{м}} = \text{м}^{-1} \right]$$



$$\mu_0 = \left[ \frac{\text{Гн} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3} = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right]$$

# ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{iS}$

При изменении тока в контуре в нем возникает **ЭДС самоиндукции**:

$$\mathcal{E}_{iS} = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -I\frac{dL}{dt} - L\frac{dI}{dt}$$

Знак минус в этой формуле обусловлен **правилом Ленца**.

Если:  $L = const$  **контур жесткий** и нет ферромагнетика как сердечника

$$\mathcal{E}_{iS} = -L\frac{dI}{dt}$$

Если наблюдается ферромагнетик:  $L = L(I) \neq const$

$$\mathcal{E}_{iS} = -I\frac{dL}{dt} - L\frac{dI}{dt} = -\left(L + I\frac{dL}{dI}\right)\frac{dI}{dt}$$

### 3. Энергия магнитного поля

Вспомним формулу для элементарной работы:

$$dA = \mathcal{E}_i Idt = -L \frac{dI}{dt} Idt = -LI dI$$

$$A = \int dA = -L \int_I^0 IdI = \frac{LI^2}{2}$$

Тогда энергия магнитного поля в соленоиде:

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Выразим **энергию** через параметры магнитного поля

□ Индуктивность соленоида:

$$L = \mu\mu_0 n^2 lS = \mu\mu_0 n^2 V$$

□ где  $V$  – объем соленоида, причем:

$$I = \frac{H}{n}$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля  $H = B/(\mu\mu_0)$

Подставим эти значения в формулу **для энергии**:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 n^2 V H^2}{2n^2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V$$

□ **Энергия маг. поля соленоида:**

$$W = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V$$

## Плотность энергии магнитного поля

- Обозначим  $w$  – плотность энергии, или энергия в объеме  $V$ .

Тогда:  $w = \frac{W}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$  но т.к.  $B = \mu\mu_0 H$  то:  $w = \frac{BH}{2} \Leftrightarrow w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$

- Энергия однородного магнитного поля **в длинном соленоиде** может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2 V$$

Тогда **плотность энергии** магнитного поля в соленоиде:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2$$

**Плотность энергии магнитного поля** в соленоиде с сердечником будет складываться из энергии поля в вакууме и поля в магнетике сердечника:

$$W = W_{\text{вак.}} + W_{\text{магнет.}}$$



$$W_{\text{магнет.}} = W - W_{\text{вак.}}$$

Вспомним, что в вакууме  $\mu = 1$ , тогда:

$$w_{\text{магнет.}} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} - \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{\mu_0 (\mu - 1) H^2}{2} = \frac{\mu_0 \chi H^2}{2}$$

**Спасибо за внимание!**

