

# ***Магнитное поле в магнетиках***

Иллюстративные материалы к лекции №4

# Основные темы лекции

1. **Аналогии между электро- и магнитостатикой**
2. **Закон полного тока в веществе**
3. **Условия на границе двух магнетиков**

# Законы для полей в вакууме

## Электростатика

Поле создается зарядами

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q_{\text{вн}}}{\epsilon_0}$$

Теорема о  
циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

## Магнитостатика

Поле создается токами

# Законы для полей в вакууме

## Электростатика

Поле создается зарядами

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q_{\text{вн}}}{\epsilon_0}$$

Теорема о  
циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

## Магнитостатика

Поле создается токами

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Силовые линии  $\mathbf{B}$   
замкнуты

# Законы для полей в вакууме

## Электростатика

Поле создается зарядами

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q_{\text{охв}}}{\epsilon_0}$$

Теорема о  
циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

## Магнитостатика

Поле создается токами

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Силовые линии  $\mathbf{B}$   
замкнуты

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k = \mu_0 I_{\text{охв}},$$

Закон полного тока

# Законы для полей в веществе

Электростатика

Магнитостатика

Поле создается зарядами

Поле создается токами

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (q_{\text{своб}} + q_{\text{связ}}).$$

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Теорема Гаусса

Теорема о  
циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$

Гипотеза  
Ампера

Закон  
полного  
тока

# Законы для полей в веществе

Электростатика

Магнитостатика

Поле создается зарядами

Поле создается токами

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (q_{\text{охл}}^{\text{своб}} + q_{\text{охл}}^{\text{связ}}).$$

$$\oint_{(S)} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) d\mathbf{S} = q_{\text{охл}}^{\text{своб}}.$$

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Теорема о циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$

$$\oint_{(L)} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J}) d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

Закон  
полного  
тока

# Законы для полей в веществе

Электростатика

Магнитостатика

Поле создается зарядами

Поле создается токами

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (q_{\text{своб}} + q_{\text{связ}}).$$

$$\oint_{(S)} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) d\mathbf{S} = q_{\text{своб}}.$$

$$\oint_{(S)} \mathbf{D} d\mathbf{S} = q_{\text{своб}}.$$

$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Теорема о циркуляции

$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$

$$\oint_{(L)} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J}) d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

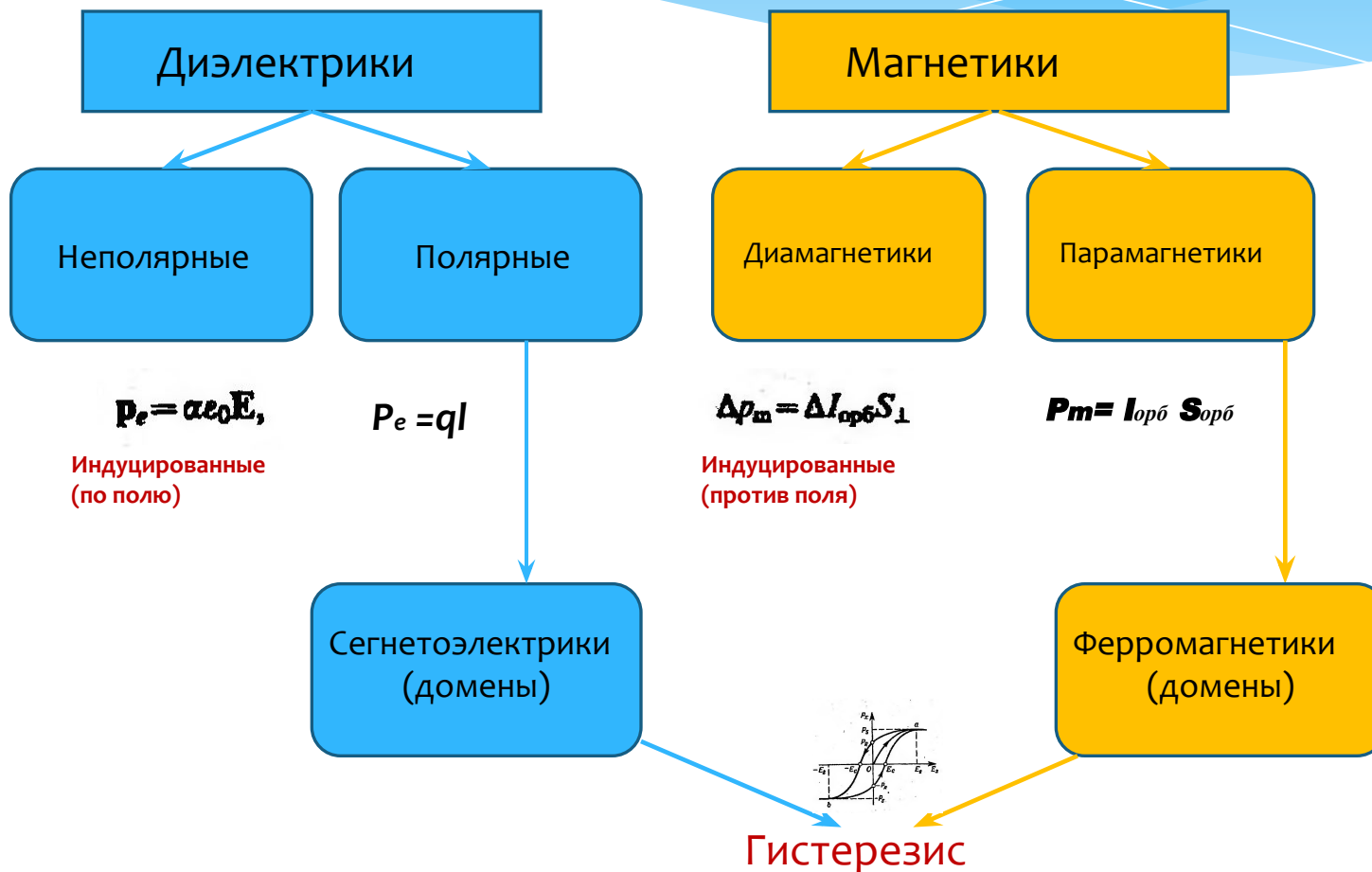
Закон  
полного  
тока



# Типы веществ

Электростатика

Магнитостатика



# Характеристики поля в веществе

## Электростатика

Векторная сумма  
дипольных  
моментов атомов  
(молекул)

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{el,i}$$

Поляризованность  
(вектор поляризации)

Зависимость от  
внешнего поля

$$\mathbf{P} = \chi \varepsilon_0 \mathbf{E},$$

Проницаемость и  
восприимчивость

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

Вспомогательная  
силовая  
характеристика

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E},$$

## Магнитостатика

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{mi,i}$$

Намагниченность  
(вектор намагниченности)

$$\mathbf{J} = \varkappa \mathbf{H}.$$

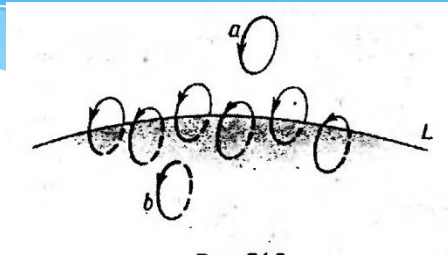
$$\mu = 1 + \varkappa$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 - \mathbf{J}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / (\mu \mu_0),$$

# Закон полного тока в веществе

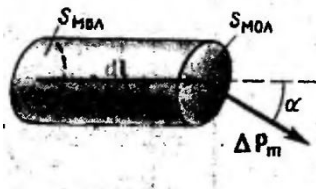
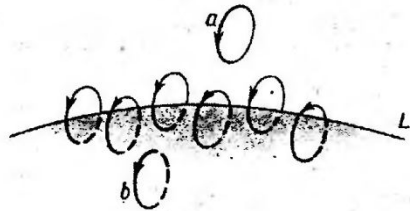
$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$



При обходе  
контура L  
вклад дают  
только  
молекулярные  
токи,  
нанизанные на  
контур

# Закон полного тока в веществе

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$



$$dn = n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha,$$

Число токов в элементе контура

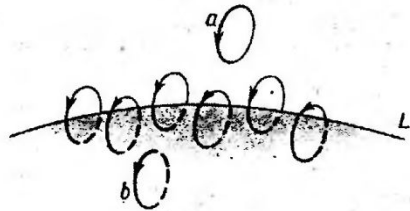
$$dI_{\text{микро}} = I_{\text{мол}} n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha = n_0 \Delta P_m dl \cos \alpha = \mathbf{J} d\mathbf{l},$$

Величина микротока в элементе контура

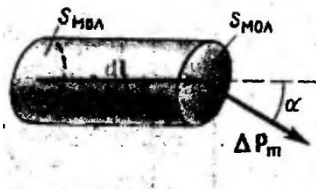
При обходе контура L вклад дают только молекулярные токи, нанизанные на контур

# Закон полного тока в веществе

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$



При обходе контура  $L$  вклад дают только молекулярные токи, нанизанные на контур



$$dn = n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha,$$

Число токов в элементе контура

$$dI_{\text{микро}} = I_{\text{мол}} n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha = n_0 \Delta P_{\text{м}} dl \cos \alpha = \mathbf{J} d\mathbf{l},$$

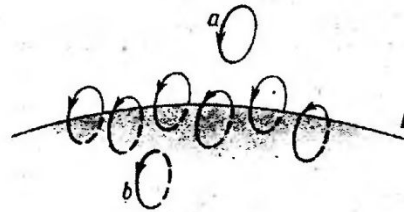
Величина микротока в элементе контура



$$I_{\text{микро}} = \oint_{(L)} \mathbf{J} d\mathbf{l}.$$

# Закон полного тока в веществе

$$\oint_{(L)} \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$



При обходе контура L вклад дают ТОЛЬКО молекулярные токи, нанизанные на контур



$$dn = n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha,$$

Число токов в элементе контура

$$dI_{\text{микро}} = I_{\text{мол}} n_0 S_{\text{мол}} dl \cos \alpha = n_0 \Delta P_m dl \cos \alpha = \mathbf{J} d\mathbf{l},$$

Величина микротока в элементе контура

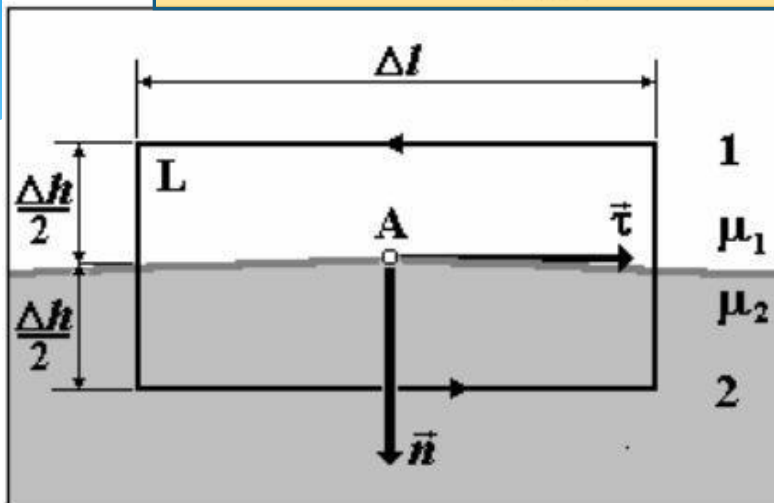
$$\longrightarrow I_{\text{микро}} = \oint_{(L)} \mathbf{J} d\mathbf{l}.$$

$$\oint_{(L)} \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} d\mathbf{l} = I_{\text{макро}} + \oint_{(L)} \mathbf{J} d\mathbf{l}.$$

$$\longrightarrow \oint_{(L)} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J}) d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

$$\oint_{(L)} \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

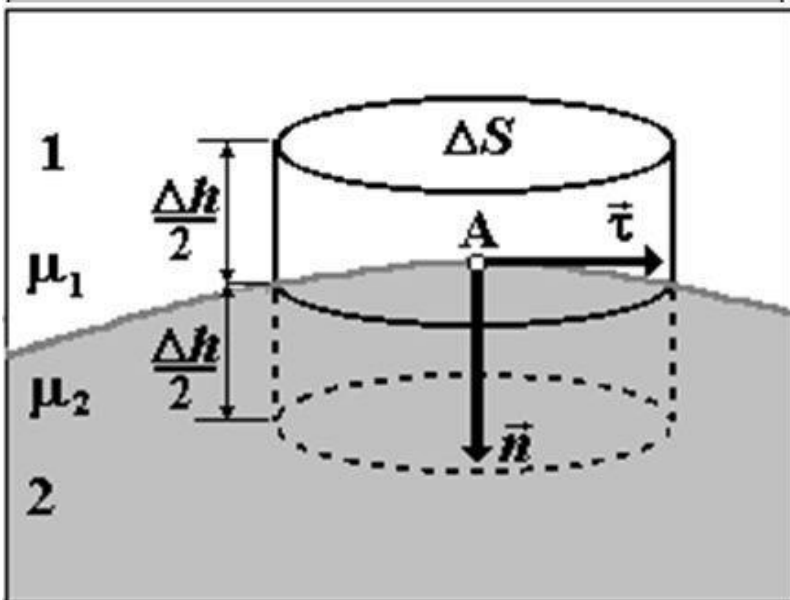
## Условия для магнитного поля на границе раздела двух изотропных сред (граничные условия)



$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = (H_{2\tau} - H_{1\tau}) \Delta l = 0$$

$$H_{2\tau} = H_{1\tau}$$

*касательная к поверхности раздела двух сред составляющая напряженности магнитного не изменяется при переходе из одной среды в другую.*



$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \oint_S (\mathbf{B}, d\mathbf{S}) = (B_{2n} - B_{1n}) \Delta S = 0$$

$$B_{2n} = B_{1n}$$

*при переходе через границу раздела двух сред, нормальная составляющая вектора магнитной индукции не изменяется*

# Условия

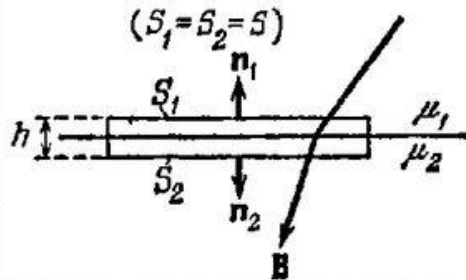
## на границе двух магнетиков

Вблизи поверхности раздела 2-х магнетиков должны выполняться следующие условия:

$$\nabla \vec{B} = 0 \quad \text{и} \quad [\nabla \vec{H}] = \vec{j}$$

Возьмем

цилиндрическую  
поверхность  
высотой  $h$  с  
основаниями  $S_1$  и  $S_2$ .



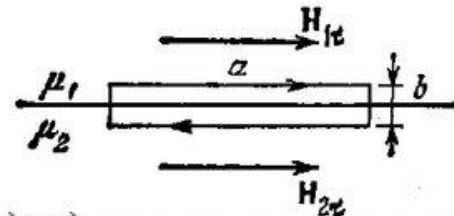
- $\Phi_B = B_{1n}S + B_{2n}S + \langle B_n \rangle S_{бок.}$   
 Т.к.  $\nabla \vec{B} = 0$ , то и  $\Phi_B = 0$ ;  $h \rightarrow 0 \Rightarrow B_{1n} = -B_{2n}$   
 Если проецировать на одну и ту же нормаль:

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$\mu_0 \mu_1 H_{1n} = \mu_0 \mu_2 H_{2n}$$

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

Нормальная составляющая вектора  $B$  изменяется непрерывно, а нормальная составляющая вектора  $H$  претерпевает разрыв.



Возьмем  
на границе  
прямоугольный  
контур и  
вычислим  
для него  
 $\oint \vec{H} d\vec{\ell}$

- $\oint \vec{H} d\vec{\ell} = H_{1t}a - H_{2t}a + \langle H_t \rangle 2b$ , где  
 $\langle H_t \rangle$  - среднее значение  $H_t$  на перпендикулярных частях контура.

Если по границе раздела не протекают макроскопические токи, то  $\oint \vec{H} d\vec{\ell} = 0$ .  
Т.к.  $b \rightarrow 0$ , то  $H_{1t} = H_{2t}$

$$\frac{B_{1t}}{\mu_0 \mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_0 \mu_2} \Rightarrow \frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

Тангенциальная составляющая вектора  $H$  изменяется непрерывно, а тангенциальная составляющая вектора  $B$  претерпевает разрыв при переходе через границу.



A blue header with a white wavy line at the bottom, transitioning into a white background.

***Спасибо за внимание!***