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	*Магнитостатика*
	Поле создается зарядами	**Поле создается токами**
Теорема Гаусса	$\oint\limits_{(S)} \mathbf{E}d\mathbf{S} = \frac{q_{охв}}{\varepsilon_0}.$	
Теорема о циркуляции	$\oint\limits_{(L)} \mathbf{E}d\mathbf{l} = 0,$	

Законы для полей в вакууме

	Электростатика	*Магнитостатика*	
	Поле создается зарядами	**Поле создается токами**	
Теорема Гаусса	$$\oint_{(S)} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q_{охв}}{\varepsilon_0}.$$	$$\oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$	**Силовые линии *B* замкнуты**
Теорема о циркуляции	$$\oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0,$$		

Законы для полей в вакууме

	Электростатика	***Магнитостатика***	
	Поле создается зарядами	**Поле создается токами**	
Теорема Гаусса	$$\oint_{(S)} \mathbf{E}d\mathbf{S} = \frac{q_{\text{охв}}}{\varepsilon_0}.$$	$$\oint_{(S)} \mathbf{B}d\mathbf{S} = 0.$$	**Силовые линии *B* замкнуты**
Теорема о циркуляции	$$\oint_{(L)} \mathbf{E}d\mathbf{l} = 0,$$	$$\oint_{(L)} \mathbf{B}d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^{n} I_k = \mu_0 I_{\text{охв}},$$	
		Закон полного тока	

Законы для полей в веществе

Электростатика — *Магнитостатика*

Поле создается зарядами — **Поле создается токами**

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E}\,d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(q_{\text{охв}}^{\text{своб}} + q_{\text{охв}}^{\text{связ}}\right).$$

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

Теорема о циркуляции

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

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

Гипотеза Ампера

Закон полного тока

Законы для полей в веществе

Электростатика | *Магнитостатика*

Поле создается зарядами | **Поле создается токами**

Теорема Гаусса

$$\oint_{(S)} \mathbf{E}\,d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(q_{\text{охв}}^{\text{своб}} + q_{\text{охв}}^{\text{связ}}\right).$$

$$\oint_{(S)} (\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})\,d\mathbf{S} = q_{\text{охв}}^{\text{своб}}.$$

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

Теорема о циркуляции

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

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

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

Закон полного тока

Законы для полей в веществе

	Электростатика	*Магнитостатика*
	Поле создается зарядами	**Поле создается токами**
Теорема Гаусса	$\oint\limits_{(S)} \mathbf{E}\,d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(q_{\text{охв}}^{\text{своб}} + q_{\text{охв}}^{\text{связ}}\right).$ $\oint\limits_{(S)} (\varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P})\,d\mathbf{S} = q_{\text{охв}}^{\text{своб}}.$ $\oint\limits_{(S)} \mathbf{D}\,d\mathbf{S} = q_{\text{охв}}^{\text{своб}}.$	$\oint\limits_{(S)} \mathbf{B}\,d\mathbf{S} = 0.$
Теорема о циркуляции	$\oint\limits_{(L)} \mathbf{E}\,d\mathbf{l} = 0,$	$\oint\limits_{(L)} \mathbf{B}\,d\mathbf{l} = \mu_0\left(I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}\right),$ $\oint\limits_{(L)} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J})\,d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$ $\oint\limits_{(L)} \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$ *Закон полного тока*

Типы веществ

Электростатика

Диэлектрики

Неполярные

$$\mathbf{p}_e = \alpha\varepsilon_0\mathbf{E},$$

Индуцированные (по полю)

Полярные

$$P_e = ql$$

Сегнетоэлектрики (домены)

Магнитостатика

Магнетики

Диамагнетики

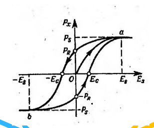
$$\Delta p_m = \Delta I_{орб} S_\perp$$

Индуцированные (против поля)

Парамагнетики

$$P_m = I_{орб} S_{орб}$$

Ферромагнетики (домены)



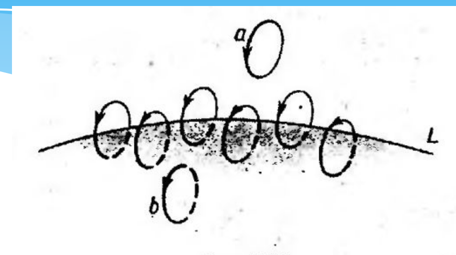
Гистерезис

Характеристики поля в веществе

	Электростатика	*Магнитостатика*
Векторная сумма дипольных моментов атомов (молекул)	$\mathbf{P}=\frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{n}\mathbf{p}_{ei},$ **Поляризованность (вектор поляризации)**	$\mathbf{J}=\frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{n}\mathbf{P}_{mi},$ **Намагниченность (вектор намагниченности)**
Зависимость от внешнего поля	$\mathbf{P}=\chi\varepsilon_0\mathbf{E},$	$\mathbf{J}=\varkappa\mathbf{H}.$
Проницаемость и восприимчивость	$\varepsilon=1+\chi$	$\mu=1+\varkappa$
Вспомогательная силовая характеристика	$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P}$ $\mathbf{D}=\varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E},$	$\mathbf{H}=\mathbf{B}/\mu_0-\mathbf{J}$ $\mathbf{H}=\mathbf{B}/(\mu\mu_0),$

Закон полного тока в веществе

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

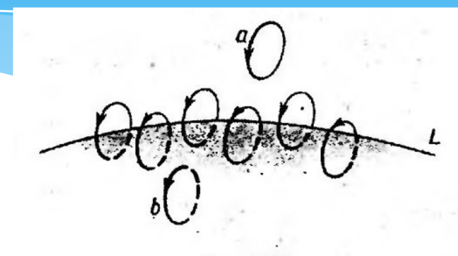


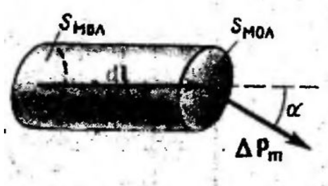
При обходе контура L вклад дают только молекулярные токи, нанизанные на контур

Закон полного тока в веществе

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

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





$$dn = n_0 S_{мол}\, dl \cos\alpha,$$

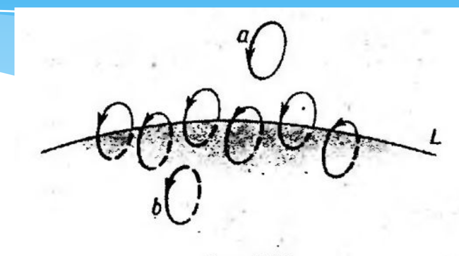
Число токов в элементе контура

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

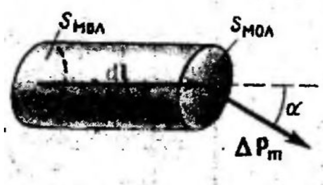
Величина микротока в элементе контура

Закон полного тока в веществе

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



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



$$dn = n_0 S_{мол}\, dl \cos\alpha,$$

Число токов в элементе контура

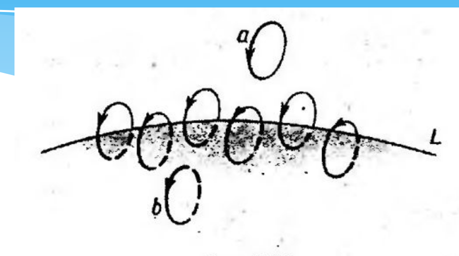
$$dI_{микро} = I_{мол} n_0 S_{мол}\, dl \cos\alpha = n_0 \Delta P_m\, dl \cos\alpha = \mathbf{J}\,d\mathbf{l},$$

Величина микротока в элементе контура

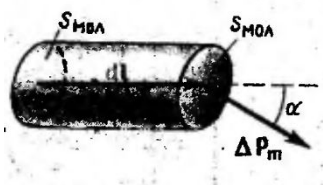
$$I_{микро} = \oint_{(L)} \mathbf{J}\,d\mathbf{l}.$$

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



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

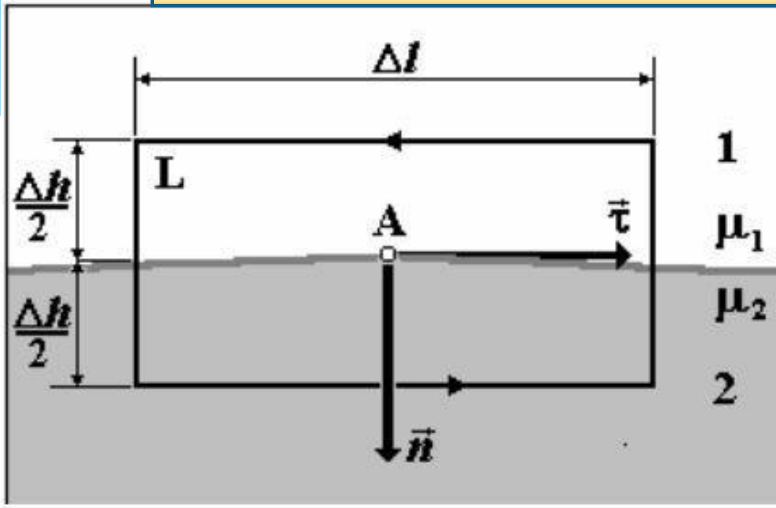
Число токов в элементе контура

$$dI_{\text{микро}} = I_{\text{мол}} n_0 S_{\text{мол}}\, dl \cos\alpha = n_0 \Delta P_m\, dl \cos\alpha = \mathbf{J}\,d\mathbf{l}, \quad \Rightarrow \quad I_{\text{микро}} = \oint_{(L)} \mathbf{J}\,d\mathbf{l}.$$

Величина микротока в элементе контура

$$\oint_{(L)} \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}\,d\mathbf{l} = I_{\text{макро}} + \oint_{(L)} \mathbf{J}\,d\mathbf{l}. \quad \Rightarrow \quad \oint_{(L)} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J})\,d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}. \quad \Rightarrow \quad \boxed{\oint_{(L)} \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.}$$

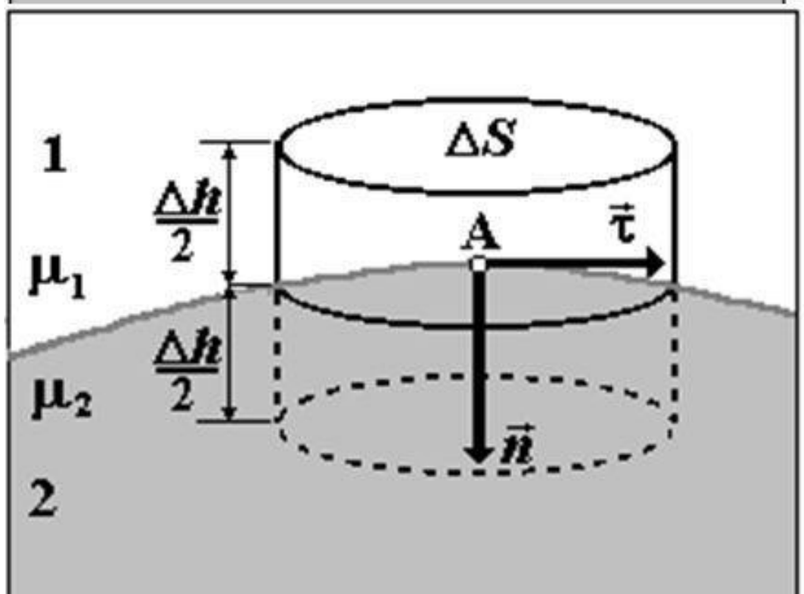
Условия для магнитного поля на границе раздела двух изотропных сред (граничные условия)



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

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

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



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

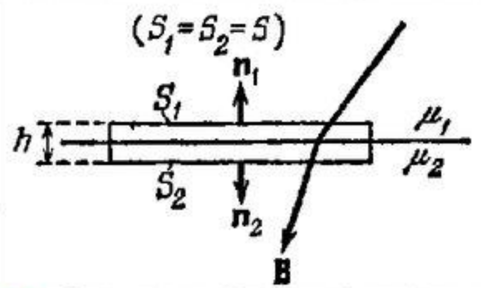
$$\boxed{B_{2n} = B_{1n}}$$

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

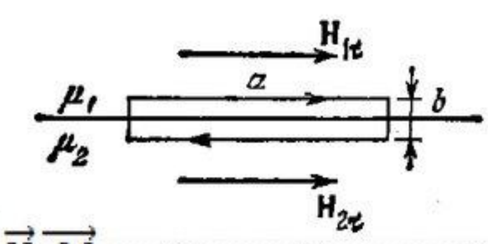
Условия на границе двух магнетиков

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

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



Возьмем цилиндрическую поверхность высотой h с основаниями S1 и S2.



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

- $\Phi_B = B_{1n}S + B_{2n}S + \langle B_n \rangle S_{бок.}$

Т.к. $\nabla\vec{B} = 0$, то и $\Phi_B = 0$; $h \to 0 \Rightarrow B_{1n} = -B_{2n}$

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.

- $\oint \vec{H}\,\vec{d\ell} = H_{1\tau}a - H_{2\tau}a + \langle H_l \rangle 2b$, где

$\langle H_l \rangle$ - среднее значение H_l на перпендикулярных частях контура.

Если по границе раздела не протекают макроскопические токи, то $\oint \vec{H}\,\vec{d\ell} = 0$.

Т.к. $b \to 0$, то $H_{1\tau} = H_{2\tau}$

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

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

Спасибо за внимание!