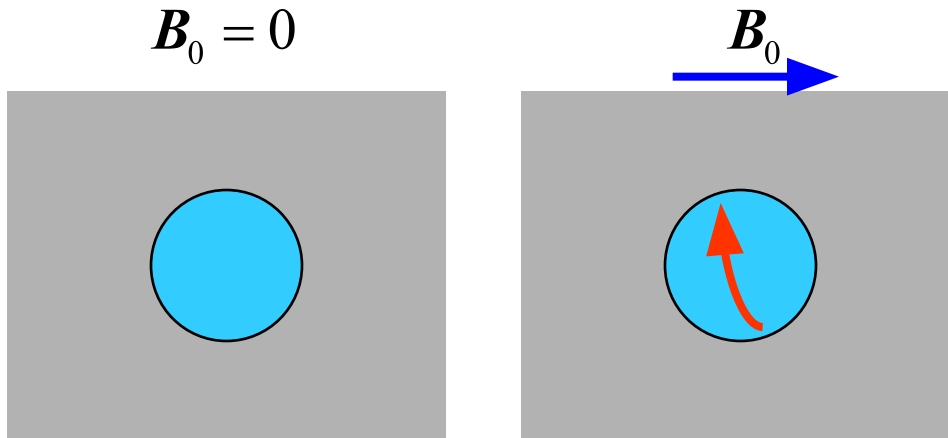


Намагничивание вещества. Вектор намагничивания J



Магнетик – вещество, способное намагничиваться.

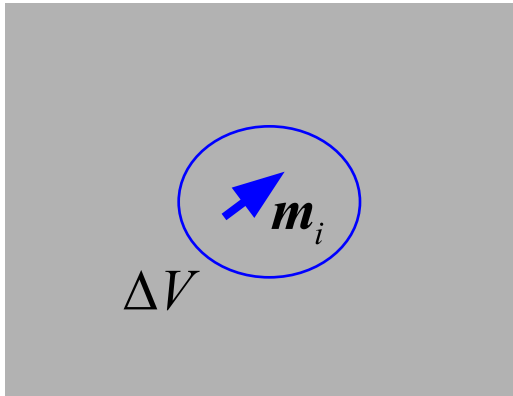
Намагничивание – наведение в веществе магнитных диполей, т. е. *токов намагничивания*.

$B = B_0 + B_\mu$ – результирующее поле

B_0 – внешнее поле (токов проводимости)

B_μ – поле токов намагничивания

Намагничивание вещества. Вектор намагничивания J



$$J = \frac{1}{\Delta V} \sum m_i$$

– вектор намагничивания

m_i – магнитный момент

Основные виды магнетиков:

1. Диамагнетики, $m_i = 0$ при $B_0 = 0$;
2. Парамагнетики, $m_i \neq 0$ при $B_0 = 0$.

m_i – магнитный момент атомов (молекул)

Намагничивание вещества. Вектор намагничивания J

Механизмы намагничивания:

1. Диамагнетики (ослабляют внешнее поле).
В поле B_0 индуцируются $m_i \uparrow \downarrow B_0$
(из-за электромагнитной индукции на молекулярном уровне)
2. Парамагнетики (усиливают внешнее поле).
В поле B_0 происходит частичная ориентация m_i по полю B_0
(из-за действия на m_i момента сил со стороны B_0)

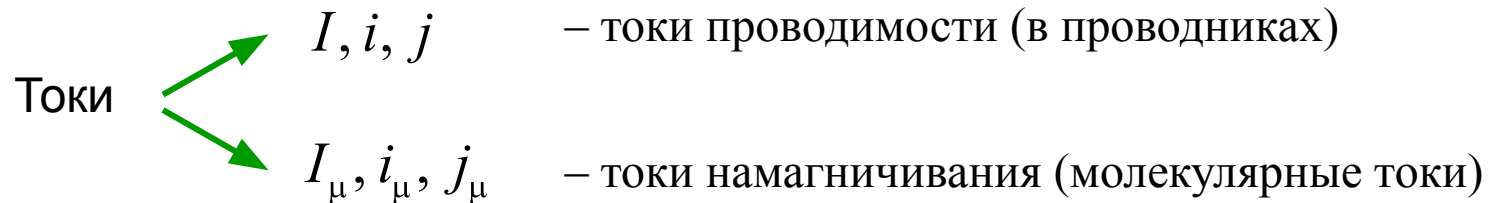
Для большинства магнетиков $\mu \approx 1$.

Исключения:

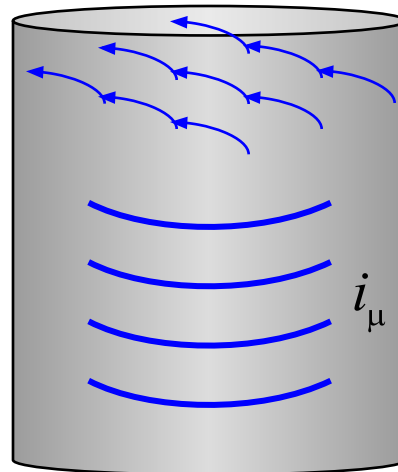
1. Ферромагнетики (сильные парамагнетики)
 $\mu \sim 10^3$
2. Сверхпроводники (идеальные диамагнетики)
 $\mu = 0$, внутри сверхпроводника $B = 0$.

Намагничивание вещества. Вектор намагничивания J

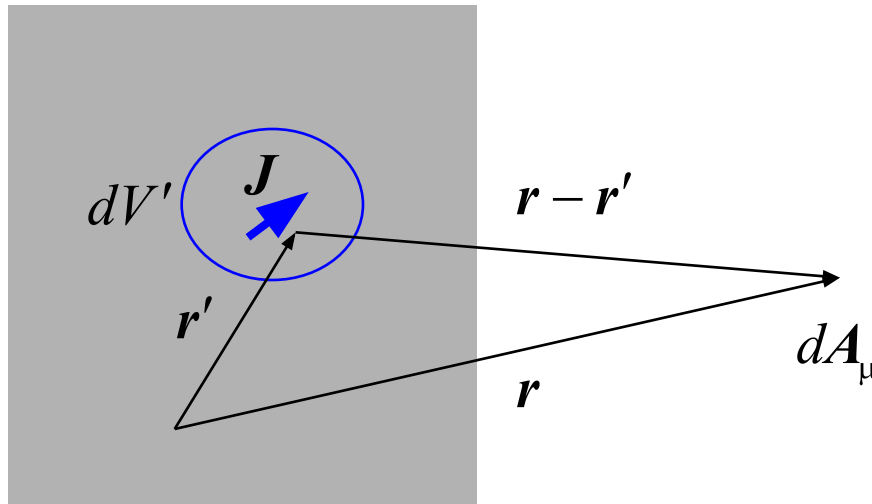
В результате намагничивания в магнетике возникают токи намагничивания.



Механизм образования токов намагничивания



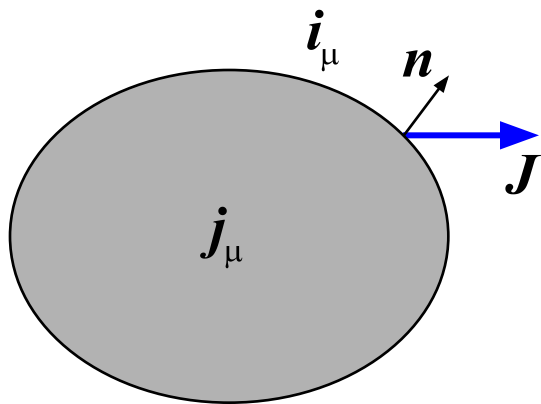
Объемные и поверхностные токи намагничивания



$$\mathbf{A}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

$$d\mathbf{A}_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \quad \Rightarrow$$

$$\mathbf{A}_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\text{rot } \mathbf{J}}{R} dV + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{n}}{R} dS \quad \Rightarrow$$



$$\mathbf{j}_\mu = \text{rot } \mathbf{J}$$

$$\mathbf{i}_\mu = \mathbf{J} \times \mathbf{n}$$

Вектор H

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{j} + \mathbf{j}_\mu) \\ \mathbf{j}_\mu &= \operatorname{rot} \mathbf{J} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \operatorname{rot} (\mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{J}) = \mathbf{j}$$

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

– вектор *напряженности* магнитного поля

Вектор H – вспомогательный вектор, *не связанный* с каким-либо физическим объектом. С его помощью во многих случаях упрощается изучение поля в магнетике.

В общем случае магнетик изменяет не только величину, но и конфигурацию магнитного поля.

Вектор H

Теорема о циркуляции для вектора H

$$\text{rot}H = j$$

– теорема о циркуляции для вектора H
(дифференциальная форма)

$$\Rightarrow \int \text{rot}(H) dS = \int j dS \quad \left\{ \begin{array}{l} \int \text{rot}(H) dS = \oint H dl \\ \int j dS = I \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\oint H dl = I$$

– теорема о циркуляции для вектора H
(интегральная форма)

Связь между векторами \mathbf{J} и \mathbf{H} , \mathbf{B} и \mathbf{H}

Для широкого класса магнетиков

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}$$

χ – магнитная восприимчивость

В случае однородного магнетика

$$\mathbf{j}_\mu = \text{rot} \mathbf{J} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{j}_\mu = \chi \text{rot} \mathbf{H} = (\mu - 1) \text{rot} \mathbf{H} = (\mu - 1) \mathbf{j} \quad \longrightarrow$$

$$\mathbf{j}_\mu = (\mu - 1) \mathbf{j}$$

При условии

$$\mathbf{j} = 0 \quad \longrightarrow \quad \mathbf{j}_\mu = 0$$

Связь между векторами \mathbf{J} и \mathbf{H} , \mathbf{B} и \mathbf{H}

В случае магнетиков, для которых

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H} \quad \longrightarrow$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}) = \mu_0 (\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) = (1 + \chi) \mu_0 \mathbf{H} \quad \longrightarrow$$

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$$

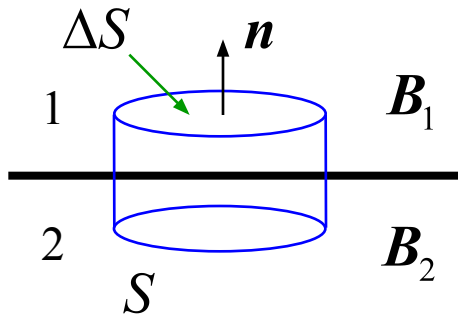
$\mu = 1 + \chi$ – магнитная проницаемость

Для диамагнетиков ($\mathbf{J} \uparrow \downarrow \mathbf{H}$) $\chi < 0$ и $\mu < 1$

Для парамагнетиков ($\mathbf{J} \uparrow \uparrow \mathbf{H}$) $\chi > 0$ и $\mu > 1$

Граничные условия для \mathbf{B} и \mathbf{H}

1 граничное условие



По теореме Гаусса для вектора \mathbf{B}

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$$

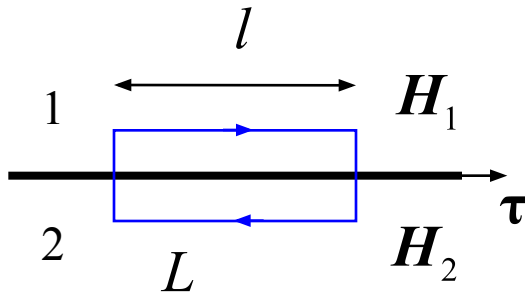
Стягиваем основания цилиндра S к границе \longrightarrow

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} \rightarrow (B_{1n} - B_{2n})\Delta S \quad \longrightarrow$$

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

Граничные условия для \mathbf{B} и \mathbf{H}

2 граничное условие



По теореме о циркуляции вектора \mathbf{H}
(при условии, что на поверхности $\mathbf{i} = 0$)

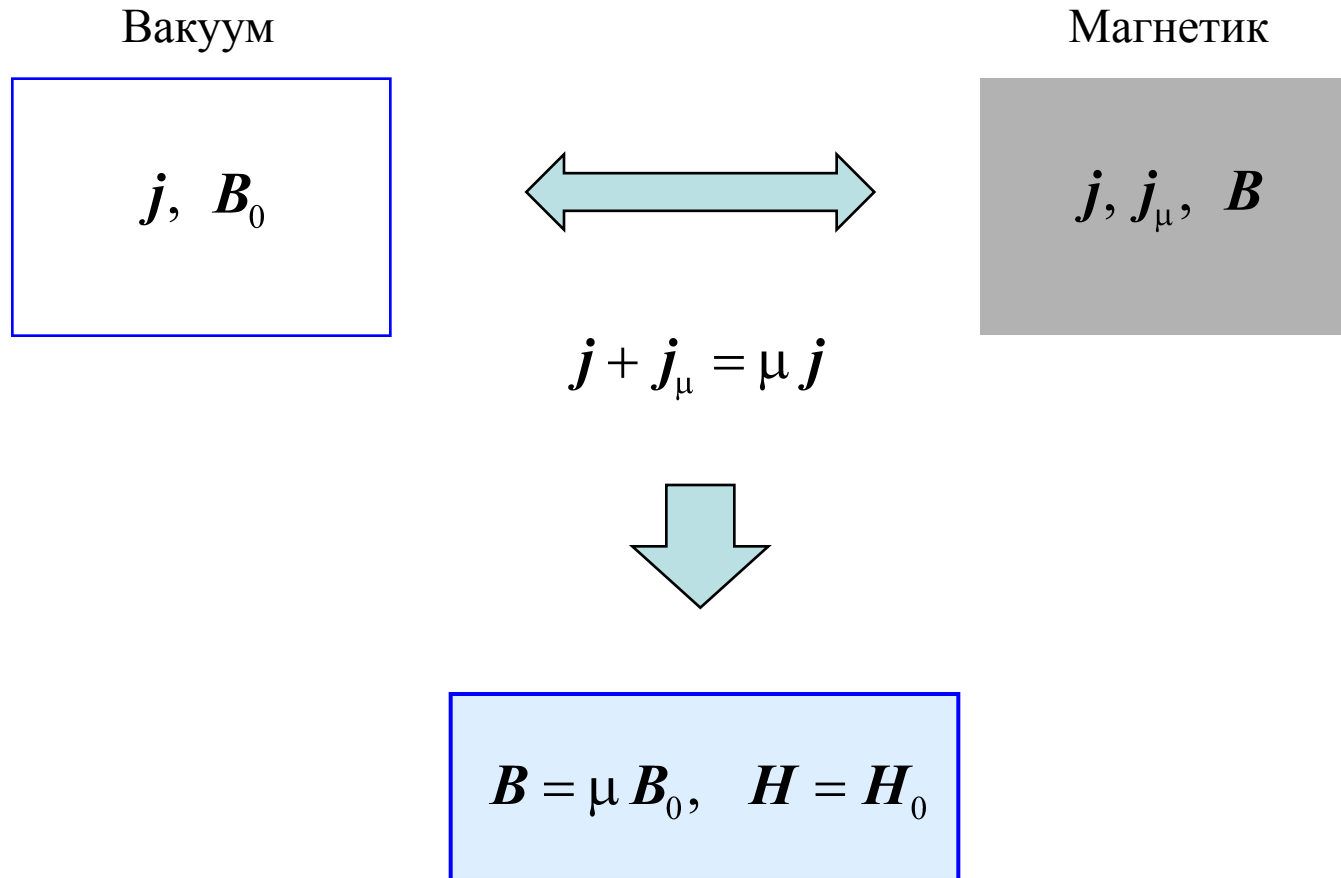
$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{r} = 0$$

Стягиваем контур L к границе \longrightarrow

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{r} \longrightarrow (H_{1\tau} - H_{2\tau})l \quad \longrightarrow$$

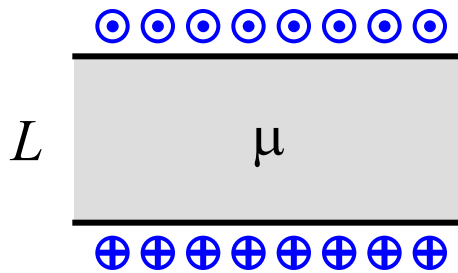
$$H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

Поле в однородном изотропном магнетике



Поле в однородном изотропном магнетике

Соленоид, заполненный магнетиком



$$B_0 = \mu_0 n I$$

$$B = \mu B_0 = \mu \mu_0 n I$$

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{NBS}{I} = \frac{N\mu B_0 S}{I} = \frac{\mu \Phi_0}{I} \quad \rightarrow$$

$$L = \mu L_0$$

L_0 – индуктивность воздушного соленоида

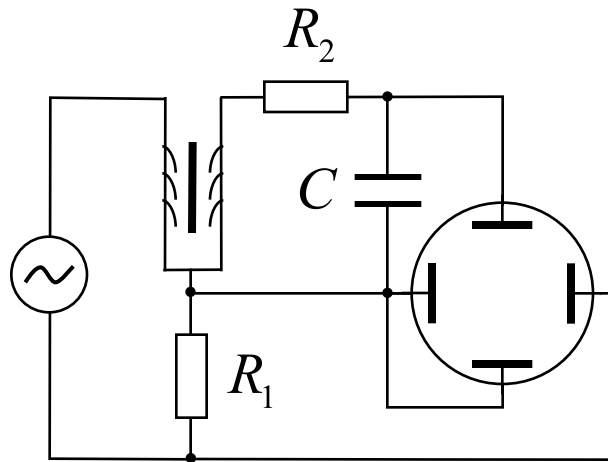
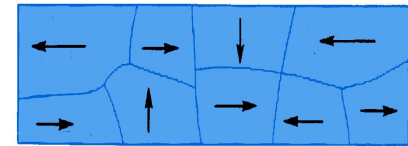
$$B = \mu \mu_0 n I$$

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

Ферромагнетики

Ферромагнетики – магнетики, спонтанно намагниченные в некотором интервале температур.

Ферромагнетик состоит из *доменов* – областей размером порядка 0.01 мм с однородной намагниченностью.

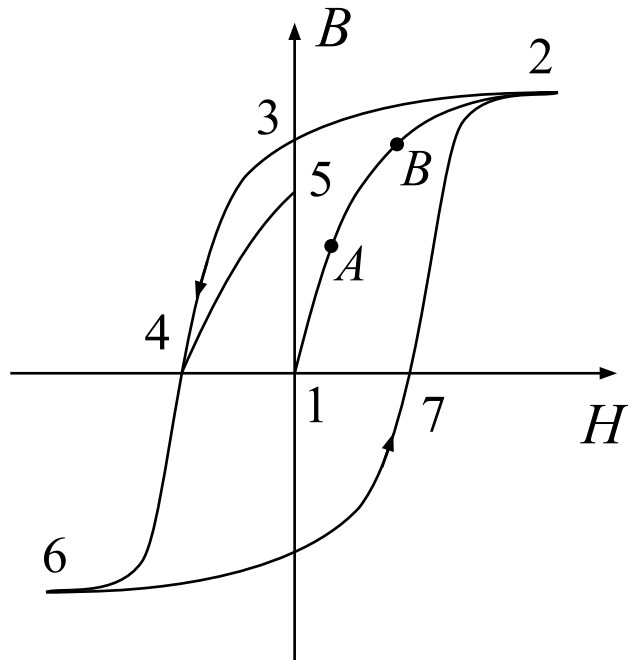


$$U_x = R_1 I \propto H$$

$$U_y = \frac{q}{C} \propto B$$

**Схема установки для наблюдения
петли гистерезиса**

Ферромагнетики



Петля гистерезиса

- 1-2* – основная кривая намагничивания;
- 1A* – обратимое смещение границ в пользу ориентированных под острым углом к полю доменов;
- AB* – необратимое смещение границ и исчезновение некоторых доменов;
- B2* – изменение направления намагниченности внутри доменов.

B_r (точка 3) – *остаточная намагниченность*

H_c (точка 4) – *коэрцитивная сила*

Температура Кюри T_K – температура фазового перехода из состояния ферромагнетика в состояние парамагнетика.

Ферромагнетики

	H_c , А/м	B_s , Тл	B_r , Тл	μ_{\max}
мягкие ферромагнетики	8÷80	0.8÷2	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$10^3 \div 10^5$
жесткие ферромагнетики	50000	~2	0.1÷0.5	~ 10^2

Использование:

Жесткие ферромагнетики для изготовления постоянных магнитов.

Мягкие ферромагнетики служат в качестве сердечников трансформаторов.