

ЛЕКЦИЯ № 8

10. Магнитное поле в веществе

Все вещества при внесении их во внешнее магнитное поле \vec{B}_0 намагничиваются, т. е. создают собственное магнитное поле \vec{B}' , которое накладывается на внешнее поле:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (8-1)$$

Физическая скалярная величина, показывающая, во сколько раз отличается результирующая магнитная индукция в веществе \vec{B} от магнитной индукции в вакууме \vec{B}_0 , называется магнитной проницаемостью вещества:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (8-2)$$

Магнитная проницаемость – безразмерная величина.

Все вещества состоят из атомов, в которых находятся в непрерывном движении заряженные частицы (в частности, электроны). Движущийся электрон можно отождествить с замкнутым контуром с током, который характеризуется магнитным моментом

$$\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}, \quad (8-3)$$

\vec{n} – единичный вектор нормали к плоскости контура.

Векторная сумма магнитных моментов электронов образует магнитный момент атома:

$$\vec{p}_{m_{\text{ат}}} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_{m_{e_i}}.$$

– если $\vec{p}_{m_{\text{ат}}} = 0$ – диамагнитный атом \rightarrow диамагнетик

– если $\vec{p}_{m_{\text{ат}}} \neq 0$ – парамагнитный атом \rightarrow парамагнетик

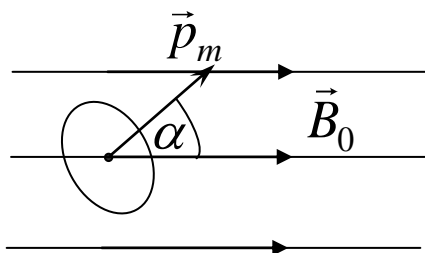
Суммарный магнитный момент всех атомов в единице объема магнетика называется намагниченностью вещества:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_{m_{\text{ат}}}}{V} \quad (8-4)$$

$$\vec{J} \uparrow \uparrow \sum \vec{p}_{m_{ат}}, \quad [J] = \text{А/м}.$$

Как ведет себя атом в магнитном поле?

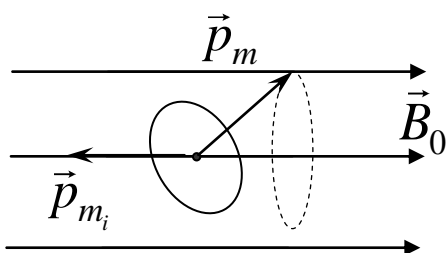
– парамагнитный атом



$$\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}_0]$$

$$B > B_0$$

– диамагнитный атом



прецессия –
диамагнитный эффект

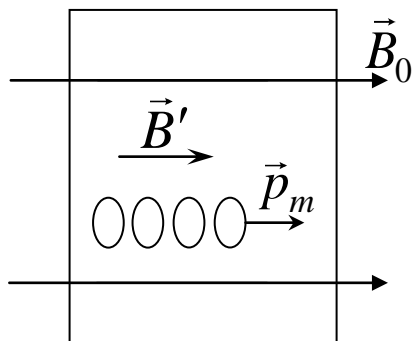
$$B < B_0$$

Вещество в магнитном поле:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

– диамагнетик $\vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0, B \leq B_0$

– парамагнетик $\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0, B \geq B_0$



$$B' = \mu_0 n I_{\text{мол}} = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \times \frac{S}{S} = \mu_0 \frac{NIS}{S\ell} = \mu_0 J$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J} \rightarrow \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad (*)$$

Тогда можно ввести вспомогательную характеристику магнитного поля – напряженность магнитного поля:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \quad \text{или} \quad \vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad (8-5)$$

Из (*) имеем:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} - \vec{B}_0) = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \left(\frac{B}{B_0} - 1 \right)$$

Но согласно (8-2) $\frac{B}{B_0} = \mu$ – магнитная проницаемость магнетика,
 $\mu - 1 = \chi_m$ – магнитная восприимчивость вещества.

диамагнетик $\chi_m = 0, \mu = 1$
 парамагнетик $\chi_m > 0, \mu > 1$

Тогда

$$\vec{J} = \chi_m \vec{H}. \quad (8-6)$$

С учетом (8-5) и (8-6) можно записать:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi_m \vec{H}.$$

Тогда

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (8-7)$$

\vec{H} – напряженность магнитного поля, как и магнитная индукция – силовая характеристика магнитного поля.

Теорема Гаусса для магнитного поля в веществе:

$$\oint_S \vec{H} d\vec{S} = \oint_S \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} d\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \oint_S \vec{B}_0 d\vec{S} = 0$$

$$\oint_S \vec{H} d\vec{S} = 0. \quad (8-8)$$

Поток вектора напряженности магнитного поля сквозь произвольную замкнутую поверхность равен нулю, это значит, что магнитных зарядов нет и внутри вещества.

Теорема о циркуляции напряженности магнитного поля в веществе:

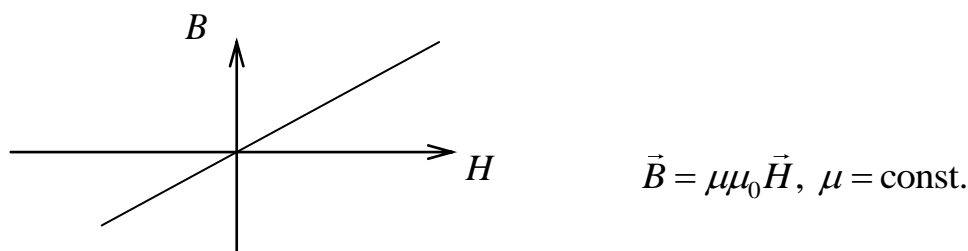
$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 (\Sigma I_{\text{пр}} + \Sigma I_{\text{мол}})$$

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \oint_{\ell} \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} d\vec{\ell} = \frac{1}{\mu_0} \oint_{\ell} \vec{B}_0 d\vec{\ell} = \Sigma I_{\text{пр}}$$

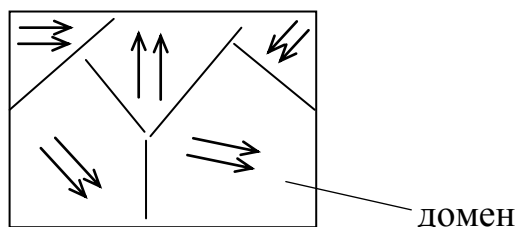
$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \Sigma I_{\text{пр}} \quad (8-9)$$

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этим замкнутым контуром.

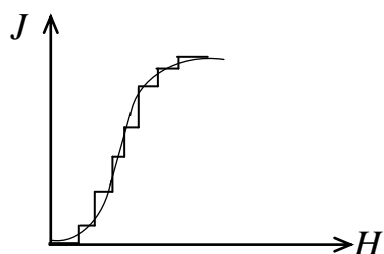
Для слабомагнитных веществ магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы (для диамагнетиков $\mu < 1$, для парамагнетиков $\mu > 1$).



Для сильномагнитных веществ (ферромагнетиков) $\mu \gg 1$. В этих веществах существуют области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания (эти области называют **доменами**), в которых магнитные моменты отдельных атомов выстраиваются параллельно друг другу. При этом ориентация магнитных моментов доменов произвольная, поэтому все вещество может быть ненамагниченным.



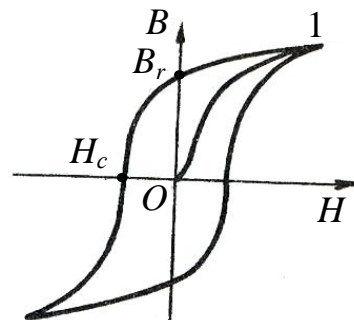
При внесении такого вещества во внешнее магнитное поле наблюдаются увеличение и поворот магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля, приводящие к увеличению результирующего поля. При этом для ферромагнетиков характерен **гистерезис** – явление отставания намагничивания ферромагнетика от изменений внешнего магнитного поля.



Эффект Баркгаузена

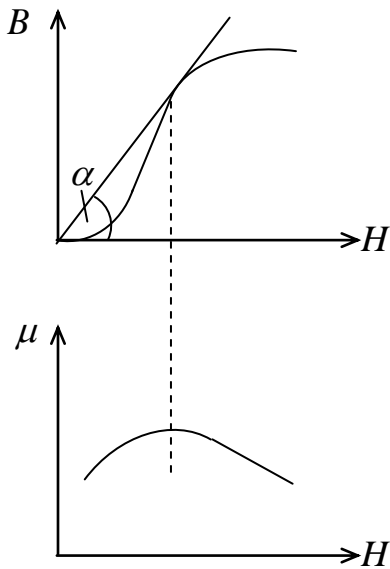
Это объясняется неравномерным ростом и поворотом разных доменов. При этом поворот доменов происходит скачкообразно.

Если провести полный цикл перемагничивания ферромагнетика, то график зависимости магнитной индукции результирующего поля от напряженности внешнего поля за один цикл перемагничивания представляет собой замкнутую кривую, которую называют **петлей гистерезиса** (см. рис., где B_r – остаточная индукция – величина индукции магнитного поля в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля; H_c – коэрцитивная сила – величина напряженности внешнего магнитного поля, при которой ферромагнетик полностью размагничивается).



Петля гистерезиса

01 – основная кривая намагничивания



$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \sim \operatorname{tg} \alpha$$

$$\mu_{\max} - !$$

Если нагревать слабомагнитное вещество (диамагнетик или парамагнетик), то за счет увеличения хаоса магнитная восприимчивость будет снижаться $\chi_m \sim 1/T$, что приведет к уменьшению намагниченности вещества.

Если нагревать ферромагнетик, то при определенной температуре (температуре Кюри) домены разрушаются и ферромагнетик становится парамагнетиком. При снижении температуры ниже температуры Кюри магнитные свойства ферромагнетика восстанавливаются.