



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ОПОРНЫЙ ВУЗ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Магнитное поле в веществе. Типы
магнетиков. Намагниченность.
Ферромагнетики, магнитный
гистерезис.

Лекция 11

Ст. преп., к. ф.-м. н. Бачурина Ольга
Владимировна

Темы для СРС

□ Р

1.1 Магнитное поле в веществе

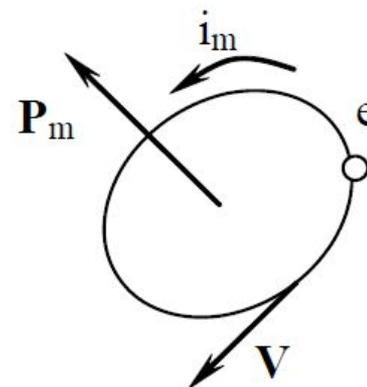
- Если проводники находятся не в вакууме, а в какой-либо среде, то магнитное поле существенно изменяется.
- Так, например, если в катушку с индуктивностью L вдвинуть железный сердечник, то индуктивность катушки возрастет, следовательно, возрастет магнитное поле внутри катушки. Это показывает, что вещество в магнитном поле намагничивается, т.е. само становится источником магнитного поля.
- Намагниченное вещество создает поле \mathbf{B}' , которое накладывается на поле токов \mathbf{B}_0 , и результирующее магнитное поле будет равно

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

- Для объяснения намагниченности вещества Ампер предположил наличие в атомах и молекулах круговых токов, обладающих магнитным моментом \mathbf{p}^m и создающих магнитное поле с индукцией $\mathbf{B} \sim \mathbf{p}^m$.

- Так, схематично рассматривая атом как систему вращающихся электронов, можно вычислить соответствующий магнитный момент

$$\mathbf{p}_m = i_m S = i_m \pi r^2, \quad \text{где } S = \pi r^2$$



1.1 Магнитное поле в веществе

- $p_m = i_m S = i_m \pi r^2$, где $S = \pi r^2$ – площадь орбиты;
если ν – частота вращения электрона, то $i = e\nu = \frac{eV}{2\pi r}$
- Тогда $p_m = \frac{eVr}{2}$

- Под действием магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов получают преимущественную ориентацию, и вещество намагничивается.
- Интенсивность намагничивания принято характеризовать вектором намагничивания \mathbf{J} – магнитным моментом единицы объема :

$$\mathbf{J} = \frac{\sum \mathbf{P}_{mi}}{V}$$

- Для однородного вещества :

$$\mathbf{J} = \mathbf{P}_m n, \text{ где } n \text{ – концентрация атомов.}$$

1.2 Напряженность магнитного поля

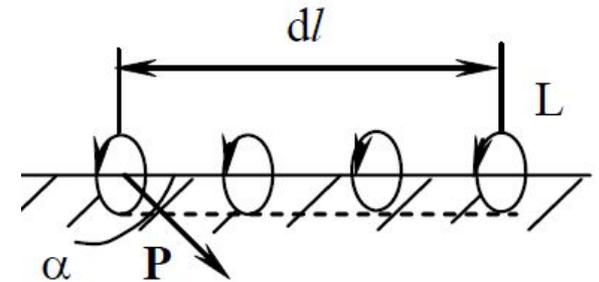
Закон полного тока в магнетике с учетом молекулярных токов имеет вид

$$\oint_L \mathbf{B}_1 d\mathbf{l} = \mu_0 i + \mu_0 I_M \quad (1)$$

Где i – ток проводников, I_M – молекулярный ток, охватываемый контуром

Для нахождения I_M подсчитаем число токов dI_M , охватываемых контуром $d\mathbf{l}$: $dI_M = i_M n S d\mathbf{l} \cos \alpha$

где i_M – отдельный молекулярный ток, S – его площадь, n – концентрация



Т.к. $i_M S = P_m$, $P_m n = \mathbf{J}$, то молекулярный ток, охватываемый всем контуром L $I_M = \oint_L dI_M = \oint_L J \cos \alpha dl = \oint_L J_1 dl$

Подставим эту формулу в (1) $\oint_L \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J} \right) d\mathbf{l} = i$

Вектор $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$ называют **напряженностью магнитного поля**.

С ее помощью закон полного тока в магнетике принимает вид:

$$\oint_L \mathbf{H}_1 d\mathbf{l} = i$$

1.2 Напряженность магнитного поля

Напряженность магнитного поля является вспомогательной величиной, а не силовой характеристикой магнитного поля.

Она вводится аналогично электрическому смещению \mathbf{D} в электростатике.

В СИ напряженность измеряют в А/м.

Вектор намагничивания принято связывать с напряженностью \mathbf{H} :

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H} \quad (2)$$

где χ – магнитная восприимчивость.

Подставим (2) в $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$, получим $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \chi \mathbf{H}$ или $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{(1 + \chi)\mu_0}$

Величина $\mu = 1 + \chi$ называется **магнитной проницаемостью вещества**.

С помощью ее находим $\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}$

1.3 Элементарные носители магнетизма

- ▶ Наличие у атомов магнитных моментов связано с движением в них электронов.
- ▶ По современным представлениям о строении атомов величина орбитального магнитного момента электрона кратна некоторой величине μ_B - магнетону Бора:

$$P_m = n \mu_B, \quad n = 0, \pm 1, \dots$$

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2m} = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Т}, \quad \hbar - \text{постоянная Планка}$$

- ▶ e и m – заряд и масса электрона.
- ▶ Двигаясь по орбите, электрон обладает и механическим моментом импульса L , кратным \hbar : $L = n \hbar$
- ▶ Отношение этих моментов называют **магнитомеханическим** (гиромагнитным) отношением, которое для орбитального движения равно:

$$g = \frac{P_m}{L} = \frac{e}{2m}$$

1.3 Элементарные носители магнетизма

▶ Помимо орбитальных моментов электрон обладает еще и собственными механическим L_S и магнитным p_{mS} моментами, которые называют также спиновыми.

▶ Первоначальное представление о спине для наглядности связывали с вращением электрона вокруг собственной оси. Однако такое представление неверное.

▶ Спин – особое свойство микрочастиц, присущее им как масса и заряд.

$$L_S = \frac{1}{2} \hbar, \quad P_{mS} = \mu_B, \quad g_S = \frac{P_{mS}}{L_S} = \frac{e}{m}$$

▶ Магнитный момент атома -будет суммой этих моментов, причем эта сумма не алгебраическая, а более сложная.

▶ Ядра также обладают магнитными моментами, однако их величина значительно меньше, чем у электронов, поэтому **магнитные моменты атомов определяются в основном магнитными свойствами электронной оболочки**

▶ Для твердого тела магнитный момент атома определяется не только составляющими его частицами, но и взаимодействием их с соседними атомами

1.3 Элементарные носители магнетизма

Измерение гиромагнитного отношения для ферромагнетиков показали, что элементарными носителями магнетизма в ферромагнетиках являются спиновые магнитные моменты электронов.

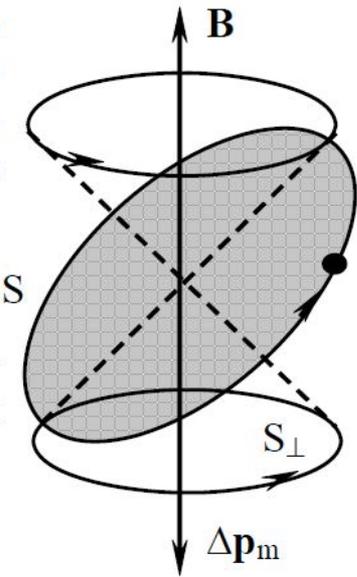
Самопроизвольно намагничиваются лишь **очень маленькие монокристаллы** ферромагнитных материалов, например никеля или железа.

1.3 Виды магнетиков

- По магнитным свойствам, в зависимости от строения атомов вещества, магнетики делятся на три группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.



1.4 ДИАМАГНЕТИЗМ



□ **Явление диамагнетизма заключается** в том, что в веществе, помещенном в магнитное поле, возникает дополнительный магнитный момент, направленный противоположно полю. Вещество при этом намагничивается противоположно внешнему полю. Это явление есть следствие электромагнитной индукции. За счет внешнего поля в атоме возникают индукционные токи, противодействующие ему, которые и создают дополнительный магнитный момент противоположного направления.

□ Электрон, вращающийся по орбите, можно представить в виде своеобразного волчка с магнитным моментом. В магнитном поле возникают силы, стремящиеся ориентировать плоскость орбиты перпендикулярно полю, что приводит к *прецессии* орбиты около направления поля

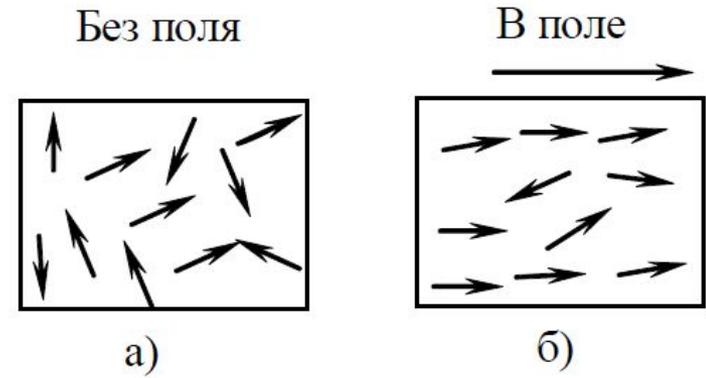
□ Прецессия – это медленное по сравнению с осевой скоростью вращение вокруг вертикальной оси. Электронная орбита при этом начнет прецессировать с угловой с $\omega_L = eB/2m$ частота Лармора

Диамагнетизм присущ всем веществам и проявляется у тех веществ, у атомов которых орбитальные и спиновые моменты взаимно скомпенсированы.

Диамагнетиками являются все инертные газы, углеводородные жидкости, вода, медь, серебро, золото, висмут и др. металлы . Диамагнитная восприимчивость для них отрицательна $\chi < 0$ и изменяется в пределах $\chi = 10^{-6} \div 10^{-5}$, а $\mu \leq 1$

1.4 Парамагнетизм

□ Если результирующий магнитный момент атома не равен нулю, то в отсутствие магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов и молекул ориентированы хаотично и вещество не намагничено (рис.а).



□ При наложении магнитного поля возникают силы, ориентирующие магнитные моменты каждого атома по полю (рис.б).

□ Объем вещества приобретает магнитный момент – оно намагничивается.

□ С повышением температуры дезориентирующая роль теплового движения увеличивается, и намагниченность убывает. П. Кюри установил закон этой зависимости: $\chi = C/T$, где χ – парамагнитная восприимчивость; C – константа

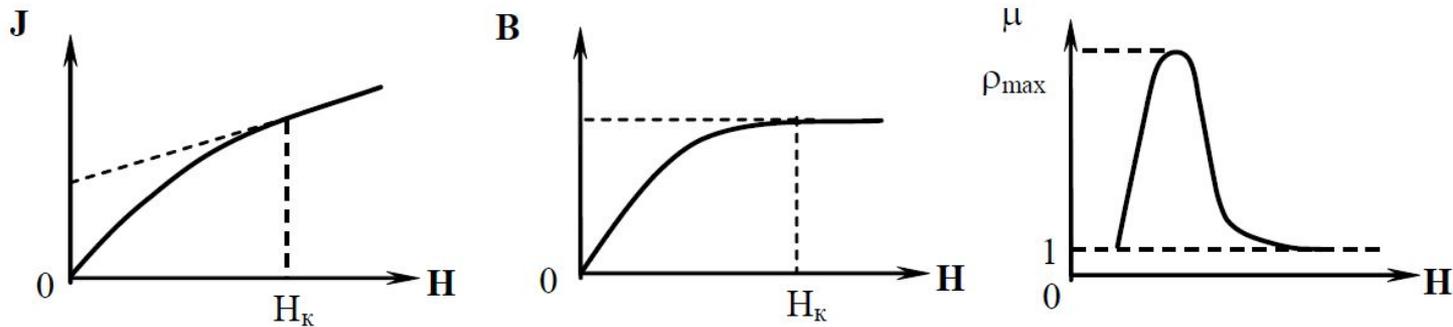
□ Парамагнетиками являются газы CO^2 , H^2 , N^2 , щелочные металлы, хром, молибден, марганец и др. Для них $\chi > 0$ и составляет $\chi = 10^{-5} \div 10^{-4}$, а $\mu \geq 1$.

1.4 Ферромагнетизм

- Термин «магнетизм» по сути, относится только к сильно магнитным веществам – ферромагнетикам, названным из-за известного представителя этого класса – железа.
- Причина ферромагнетизма лежит не только в строении атомов, но и в связи между атомами в кристалле. У атомов ферромагнетиков имеются незаполненные электронные слои, в результате возникает нескомпенсированный магнитный момент. Однако в отличие от парамагнетиков у ферромагнетиков расстояния между атомами устанавливается **сильное взаимодействие**. В результате спины атомов устанавливаются параллельно, что приводит к появлению связанных со спинами магнитных моментов. Вследствие объединения большого числа таких атомов возникает спонтанная (самопроизвольная) намагниченность, более сильная, чем способность создать внешнее поле. Такие **области спонтанной намагниченности называют доменами**.
- В отсутствие внешнего поля наличие доменов не проявляется, т.к. каждый из них имеет случайную ориентацию. Полное упорядочение в расположении доменов происходит лишь во внешнем поле.

1.4 Ферромагнетизм

□ При возрастании напряженности внешнего поля H домены с наиболее выгодной ориентацией увеличивают свои размеры за счет процессов смещения границ и вращения, и при больших напряженностях процесс завершается – вещество намагничивается. Процесс намагничивания ферромагнетиков впервые исследовал А.Г. Столетов. Кривые намагничивания, полученные им, показаны на рисунке:



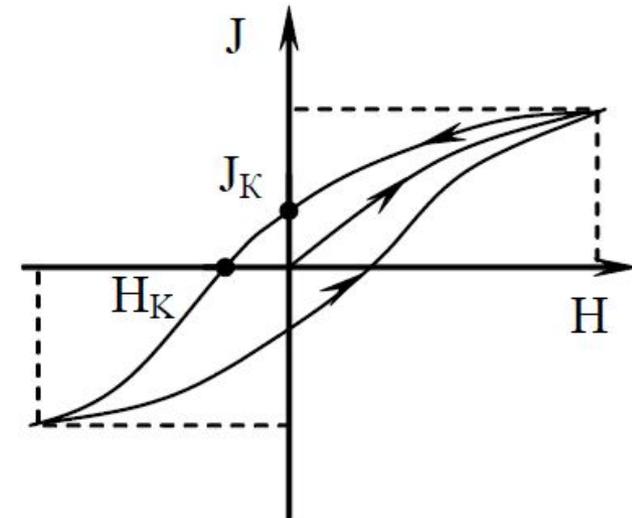
□ Для ферромагнетиков магнитная проницаемость достигает больших значений. Так, для железа, например, $\mu^{\max} = 5000$.

□



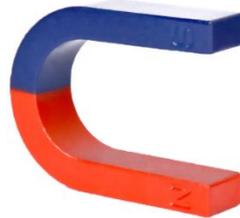
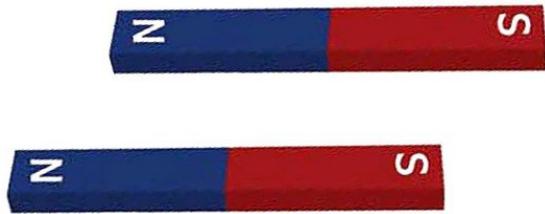
1.4 Ферромагнетизм. Магнитный гистерезис

- При намагничивании ферромагнетика в переменном по величине и направлению внешнем поле А.Г. Столетов обнаружил у них **способность сохранять намагниченность**.
- Это приводит к **магнитному гистерезису**:
- Здесь H^K – коэрцитивная сила;
- J^K – остаточная намагниченность.
- С повышением температуры остаточная намагниченность у ферромагнетиков уменьшается.
- При достаточно высокой температуре – **точке Кюри** – она полностью исчезает. Так, для железа она 780°C , никеля 350°C , кобальта 1150°C .
- Коэрцитивная сила и форма петли гистерезиса характеризуют свойство ферромагнетика сохранять остаточное намагничивание и определяют их использование для различных целей.



1.4 Ферромагнетизм. Магнитный гистерезис

□ Ферромагнетики с *широкой петлей* гистерезиса называются **жесткими магнитными материалами** (углеродистые, вольфрамовые, хромовые, алюминиево-никелевые и другие стали). Они обладают большой коэрцитивной силой и используются для создания постоянных магнитов различной формы (полосовых, подковообразных, магнитных стрелок).



□ **К мягким магнитным** материалам, обладающим малой коэрцитивной силой и *узкой петлей* гистерезиса, относятся железо, сплавы железа с никелем. Эти материалы используются для изготовления сердечников трансформаторов, генераторов и других устройств, по условиям работы которых происходит перемагничивание в переменных магнитных петлях

