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

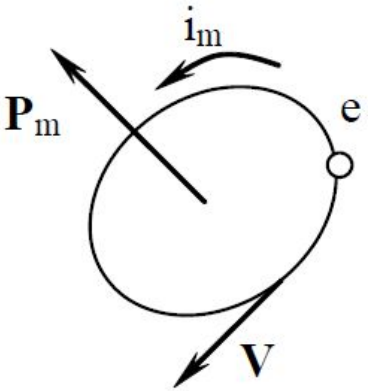
1.1 Магнитное поле в веществе

- 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 **B**', которое накладывается на поле токов **B0**, и результирующее магнитное поле будет равно

$$B = B_0 + B'$$

- 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

$$p_m = i_m S = i_m \pi r^2, \quad \text{где } S = \pi r^2$$



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 $i = e\nu = \dfrac{eV}{2\pi r}$

- Тогда $p_m = \dfrac{eVr}{2}$

- Под действием магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов получают преимущественную ориентацию, и вещество намагничивается.
- Интенсивность намагничивания принято характеризовать <u>вектором намагничивания **J**</u> – магнитным моментом единицы объема :

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

- Для однородного вещества :

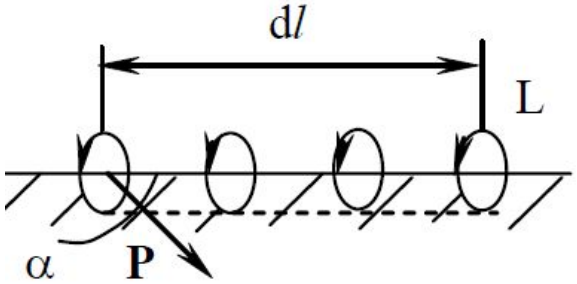
$$\mathbf{J} = \mathbf{P}_m n, \text{ где } n \text{ – концентрация атомов}$$

1.2 Напряженность магнитного поля

- Закон полного тока в магнетике с учетом молекулярных токов имеет вид
- $$\oint_L B_l dl = \mu_0 i + \mu_0 I_M \qquad (1)$$

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

- Для нахождения I_M подсчитаем число токов dI_M, охватываемых контуром d*l*: $dI_M = i_M n S\, dl \cos\alpha$



- где i_M– отдельный молекулярный ток,

S – его площадь, n – концентрация

- Т.к. $i_M S = P_m$, $P_m n = J$, то молекулярный ток, охватываемый всем контуром L $I_M = \oint_L dI_M = \oint_L J\cos\alpha\, dl = \oint_L J_l dl$
- Подставим эту формулу в (1) $\oint_L \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}\right)_l dl = i$
- Вектор $H = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$ называют **<u>напряженностью</u> магнитного поля.**
- С ее помощью **закон полного тока в магнетике** принимает вид:

$$\oint_L H_l dl = i$$

1.2 Напряженность магнитного поля

- Напряженность магнитного поля является вспомогательной величиной, а не силовой характеристикой магнитного поля.
- Она вводится аналогично элекрическому смещению **D** в электростатике.
- В СИ напряженность измеряют в А/м.
- Вектор намагничивания принято связывать с напряженностью **H**:
- $$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H} \quad (2)$$
- где χ – магнитная восприимчивость.
- Подставим (2) в $\mathrm{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$, получим $\mathrm{H} = \frac{\mathrm{B}}{\mu_0} - \chi \mathrm{H}$ или $\mathrm{H} = \frac{\mathrm{B}}{(1+\chi)\mu_0}$
- 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: $P_m = n\mu_B, \qquad n = 0, \pm 1, \ldots$

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

- 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.

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

- 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

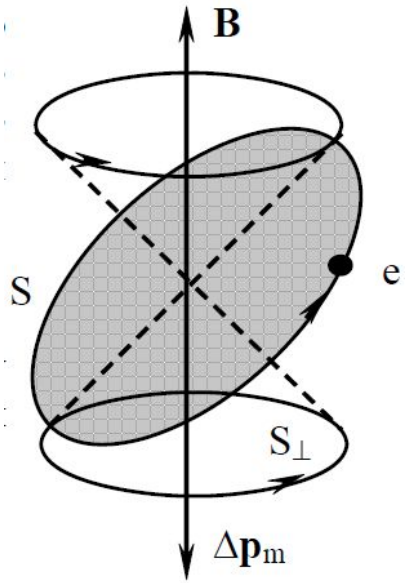
Измерение гиромагнитного отношения для ферромагнетиков показали, что элементарными носителями магнетизма в ферромагнетиках являются спиновые магнитные моменты электронов.

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.

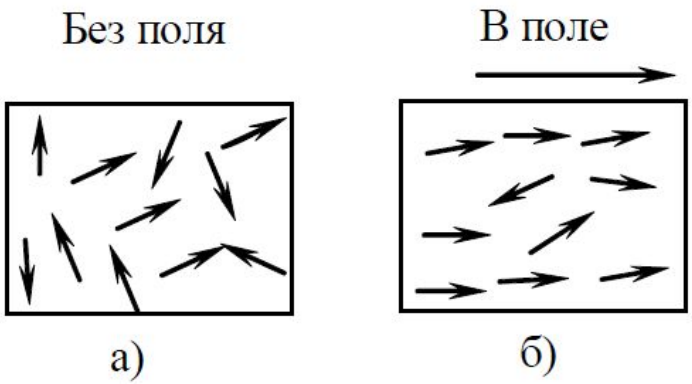
Электрон, вращающийся по орбите, можно представить в виде своеобразного волчка с магнитным моментом. В магнитном поле возникают силы, стремящиеся ориентировать плоскость орбиты перпендикулярно полю, что приводит к *прецессии* орбиты около направления поля

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

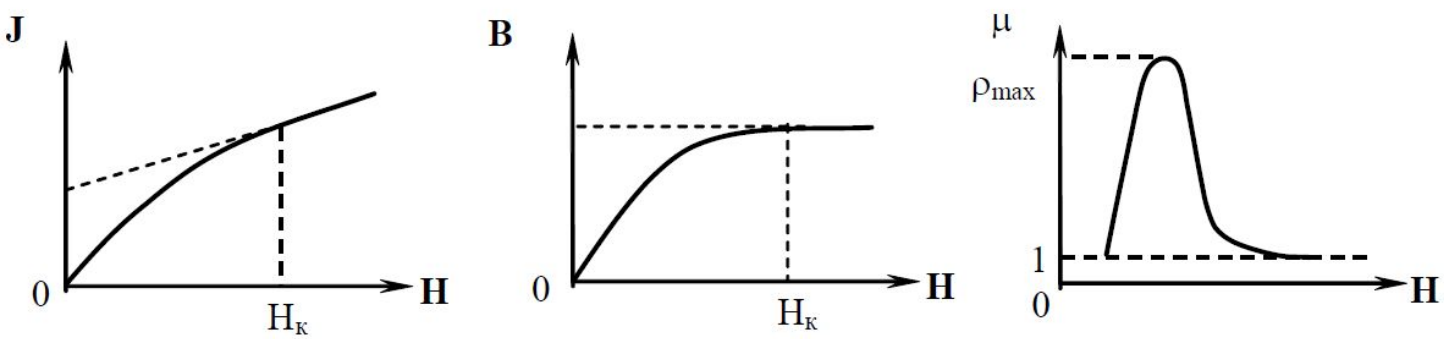
Парамагнетиками являются газы CO^2, H^2, N^2, щелочные металлы, хром, молибден, марганец и др. Для них $\chi > 0$ и составляет $\chi = 10^{-5} \div 10^{-4}$, а $\mu \geq 1$.

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 расстоя-ния между атомами устанавливается **сильное взаимодействие**. В результате спины атомов устанавливаются параллельно, что приводит к появлению свя-занных со спинами магнитных моментов. Вследствие объединения большого числа таких атомов возникает спонтанная (самопроизвольная) намагничен-ность, 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

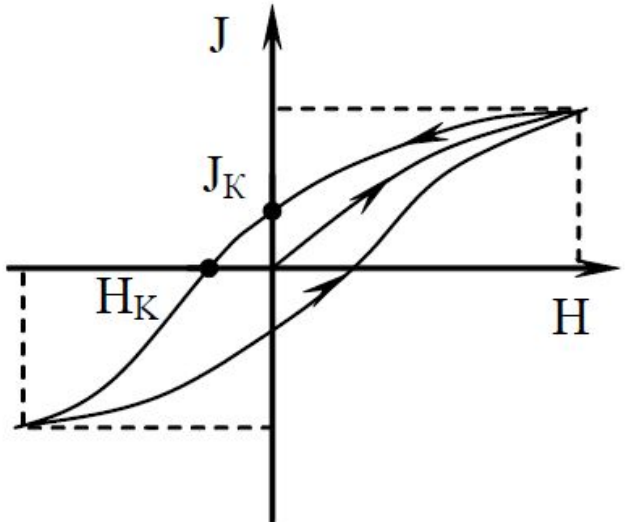
При намагничивании ферромагнетика в переменном по величине и направлению внешнем поле А.Г. Столетов обнаружил у них с**пособность сохранять намагниченность.**

Это приводит к **<u>магнитному гистерезису:</u>**

Здесь $H^{к}$ **–** коэрцитивная сила;

$J^{к}$ – остаточная намагниченность.

С повышением температуры остаточная намагниченность у ферромагнетиков уменьшается.

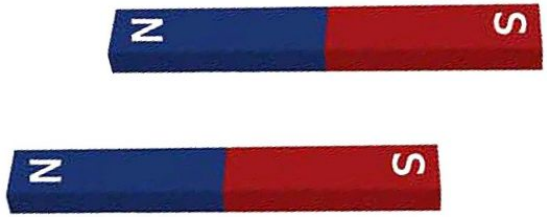


При достаточно высокой температуре – **<u>точке Кюри</u>** – она полностью исчезает. Так, для железа она 780^0С, никеля 350^0С, кобальта 1150^0С.

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