

4.6. Магнитное поле в веществе

Индуктивность длинного соленоида L можно измерить, анализируя, например, переходной процесс при размыкании или замыкании тока. Опыт показывает, что индуктивность зависит от типа вещества, заполняющего соленоид. Поскольку индуктивность длинного соленоида пропорциональна магнитной индукции

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{BSN}{I},$$

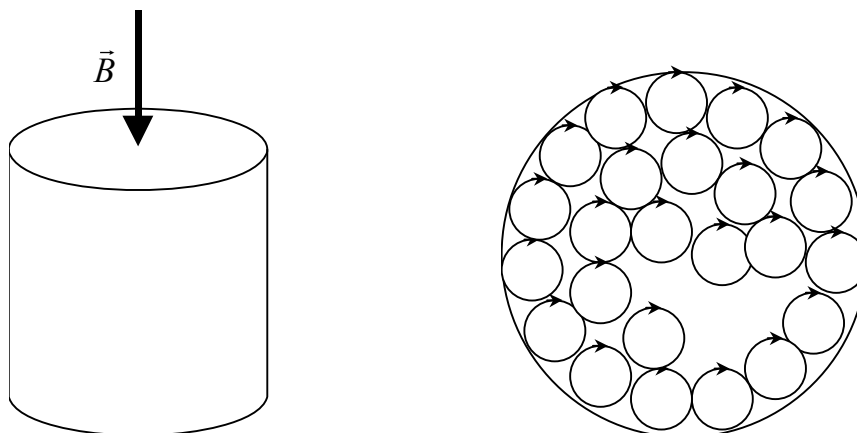
то отношение индуктивностей заполненного веществом и "пустого" соленоида характеризует изменение магнитного поля в веществе по сравнению с магнитным полем в вакууме:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{B}{B_0} = \mu.$$

Величину μ называют магнитной проницаемостью вещества.

Изменение магнитного поля в веществе можно объяснить на основе представлений о молекулярных (амперовых) токах - это мельчайшие токи, замыкающиеся в пределах каждого атома. Если нет внешнего магнитного поля, то молекулярные токи расположены беспорядочно и не создают магнитного поля. Если включить внешнее магнитное поле, то молекулярные токи частично или полностью упорядочиваются. Упорядоченные молекулярные токи создают свое магнитное поле \vec{B}' , которое складывается с внешним магнитным полем \vec{B}_0 :

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



Пусть, например, в длинный соленоид вставлен алюминиевый цилиндрический стержень. При пропускании через соленоид тока молекулярные токи упорядочиваются так, что их магнитные моменты выстраиваются преимущественно по магнитному полю \vec{B}_0 , созданному в соленоиде током I . Молекулярные токи соседних молекул в местах их соприкосновения текут в противоположных направлениях и компенсируют друг друга. Нескомпенсированными остаются только молекулярные токи, выходящие на наружную боковую поверхность (см. рис.). Видно, что результатом такого упорядочивания будет протекание некоторого поверхностного тока I' , который называется током намагничивания. Тогда

$$B = \mu_0 I \left(\frac{N}{l} \right) + \mu_0 \frac{I'}{l}.$$

Общий подход к расчету магнитного поля в магнетиках

1. Таким образом, внешнее магнитное поле возбуждает в среде токи намагничивания, которые обусловлены ориентацией под действием магнитного поля микротоков Ампера. Теорема о циркуляции вектора \vec{B} содержит в правой части не только ток проводимости, но и ток намагничивания

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I + I'). \quad (1)$$

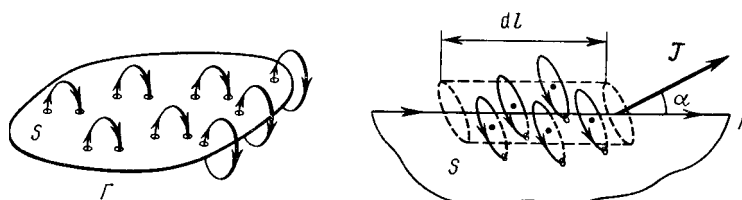
Поскольку ток намагничивания сам зависит от магнитного поля, эта формула оказывается мало полезной для расчета магнитного поля в веществе.

2. Среду с упорядоченными токами Ампера будем характеризовать вектором намагниченности, который по определению равен магнитному моменту единицы объема:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_m \quad (2)$$

Можно доказать теорему о циркуляции вектора намагниченности: циркуляция вектора намагниченности по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов намагниченности, пронизывающих поверхность, натянутую на данный контур:

$$\oint_L \vec{J} d\vec{l} = I' \quad (3)$$



Доказательство:

Натянем на контур "Г" произвольную поверхность S . Видно, что некоторые молекулярные токи пронизывают поверхность дважды - раз в одном направлении, раз в другом. Поэтому эти токи не дают вклада в результирующий ток через поверхность S . Вклад в результирующий ток через поверхность дают лишь те токи, которые пересекают поверхность один раз. Пусть каждый молекулярный ток равен I_1 , а площадь, охватываемая им, S_1 . Тогда, как видно из рис. элемент контура dl обвивают те молекулярные токи, центры которых попадают внутрь косоугольного цилиндра с площадью основания S_1 . Угол α - угол между нормалью к плоскости молекулярного тока и вектором $d\vec{l}$, то есть угол между вектором намагниченности \vec{J} и вектором $d\vec{l}$. Вклад этих молекулярных токов в общий ток намагниченности через поверхность S , равен

$$dI' = I_1 n dV,$$

где $dV = S_1 \cos \alpha dl$, n - концентрация молекул. Поэтому

$$dI' = I_1 n S_1 dl \cos \alpha = p_m n dl \cos \alpha = J dl \cos \alpha = \vec{J} d\vec{l}.$$

Проинтегрировав полученное выражение по всему контуру "Г", получим (1)

3. Введем вспомогательный вектор

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}, \quad (3)$$

который называют вектором напряженности магнитного поля (но чаще - просто вектором \vec{H}). Вычислим циркуляцию этого вектора по замкнутому контуру

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} \oint_L \vec{B} d\vec{l} - \oint_L \vec{J} d\vec{l} = (I + I') - I' = I$$

Итак, циркуляция вектора \vec{H} по замкнутому контуру определяется только током проводимости:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I. \quad (4)$$

Формула (4) выражает теорему о циркуляции вектора \vec{H} .

4. Для многих веществ (магнетиков) между \vec{H} и \vec{J} имеет место линейная зависимость

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (5)$$

Тогда из формулы (3) следует

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (6)$$

где $\mu = 1 + \chi$ - магнитная проницаемость, зависящая от свойств вещества. Полученные формулы позволяют рассчитывать магнитное поле в веществе и намагниченность вещества. Теорему о циркуляции вектора \vec{H} при помощи теоремы Стокса можно представить и в дифференциальном виде:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad (7)$$

где j - плотность тока проводимости.

Пример. Магнитное поле в длинном цилиндрическом проводе с током.

5. Магнитные свойства вещества гораздо разнообразнее, чем его электрические свойства. Магнитная проницаемость может быть как больше, так и меньше 1. Вещества, для которых $\mu > 1$ называют **парамагнетиками**, вещества для которых $\mu < 1$ называют **диамагнетиками**, вещества для которых $\mu \gg 1$ - **ферромагнетиками**.

Вещество	Магн. проницаемость	
Воздух	1,000038	Парамагнетики
Эбонит	1,000014	
Алюминий	1,000023	
Вольфрам	1,000253	
Вода	0,999991	Диамагнетики
Стекло	0,999987	
Висмут	0,999824	
Медь	0,999912	

Железо	100 - 100000	Ферромагнетики
Кобальт		
Никель		

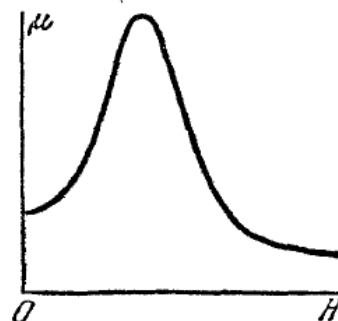
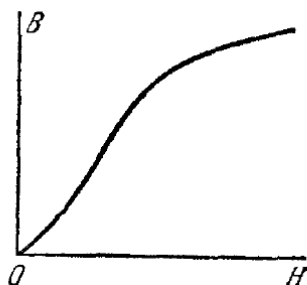
Хотя для парамагнетиков и диамагнетиков магнитная проницаемость очень близка к 1, их поведение в магнитном поле отличается качественно. Диамагнетизм на первый взгляд противоречит гипотезе Ампера о микротоках, которые ориентируются в магнитном поле так, что вектора их магнитных моментов устанавливаются в направлении вектора \vec{B}_0 . Ослабление поля в диамагнетиках означает, что магнитные моменты молекулярных токов ориентированы против поля \vec{B}_0 . Поэтому, несмотря на слабость эффекта, его объяснение с точки зрения физики имеет большое значение.

Диамагнетизм заметно проявляется лишь в тех веществах, атомы которых в отсутствие магнитного поля не обладают магнитным моментом. Модель простейшего диамагнитного атома можно представить себе следующим образом: два электрона вращаются вокруг ядра по одной орбите, но в противоположных направлениях. Результирующий круговой ток при таком движении электронов равен нулю, поэтому равен нулю и магнитный момент.

При включении магнитного поля в силу закона электромагнитной индукции возникает вихревое электрическое поле, которое изменяет скорость движения электронов. Нетрудно понять, что это вихревое поле увеличивает скорость одного электрона и уменьшает скорость другого. В результате в рассматриваемой системе возникает круговой ток, который по правилу Ленца ослабляет магнитное поле в веществе. Итак, в основе диамагнетизма лежит электромагнитная индукция.

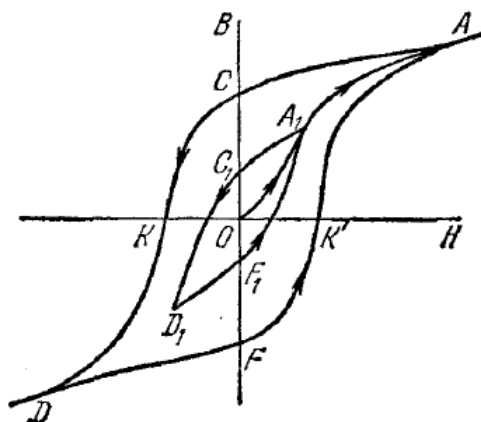
Ферромагнетики – твердые тела, которые могут обладать спонтанной намагниченностью, то есть намагничены уже в отсутствие магнитного поля. Типичные представители: железо, кобальт, никель, их сплавы. Основные особенности ферромагнетиков:

- 1) Спонтанная намагниченность
- 2) Нелинейная зависимость \vec{B} от \vec{H} .
- 3) Очень большая величина магнитной проницаемости. Зависимость магнитной проницаемости от величины поля.



- 4) Гистерезис - явление зависимости вектора намагничивания в веществе не только от напряженности магнитного поля \vec{H} , но и от предыстории данного образца.

Гистерезис связан с доменной структурой ферромагнитного образца, состоящего из небольших областей (доменов) со спонтанной намагниченностью.



- 5) Для всякого ферромагнетика существует определенная температура, называемая температурой Кюри. При температуре выше температуры Кюри ферромагнетик превращается в парамагнетик.