

**Прочитайте вступление к учебной лекции.**

**Если читали ранее – можно пропустить этот блок информации.**

Учебная лекция в ДО – это учебный материал для конспектирования

Инструкция для работы с учебным материалом (для конспектирования):

1. Первый раз прочитайте всю лекцию, ничего не записывая.
2. Ответьте мысленно на вопрос, что главное в лекции, из скольких основных частей лекция состоит (*на сколько частей ее можно мысленно разбить*), придумайте название для каждой части – это будет план конспекта.
3. Откройте тетрадь для лекций и запишите в тетради тему, дату лекции и план конспекта.
4. Второй раз начинайте читать лекцию и приступайте к конспектированию: в соответствии с планом – в каждой части плана пишите определения величин, формулы законов, формулировки законов, делайте рисунки к разбираемым примерам или другому. Чем больше будет ваших записей, поясняющих о чем идет речь, тем лучше вы поймете и запомните учебный материал.

Внимание! Важно обращать внимание на то, что вы описываете – явление, закон, величину или другое понятие (например, модель объекта).

Руководствуйтесь правилами:

А) если описываете явление – запишите особенности рассматриваемого явления (*в чем заключается явление, каковы условия его возникновения, какие законы и величины используются для исследования явления*)

В) если описываете величину – запишите определение величины (*укажите физическая скалярная или векторная величина, формулу/ы для определения величины, единицу величины, поясните, что характеризует и, если векторная величина, то она как направлена*),

С) если описываете понятие (не величину) – запишите одно предложение, которое раскрывает смысл понятия (*для примера см. система отсчета, материальная точка, система материальных точек и др.*),

Д) если описываете закон – название, формулу, формулировку, физический смысл запишите закона. **Помните, что при записи формулы надо расшифровать названия величин, входящих в данную формулу.**

## **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО СВОЙСТВА**

**Магнитное поле. Магнитное поле проводника с током.**

**Характеристики и законы магнитного поля.**

### Введение

Магнитное поле – особый вид материи. Его нельзя свести к электрическому полю, поскольку они обладают разными свойствами. Так,

например, электрическое поле создается электрическими зарядами, которые могут быть как неподвижными, так и подвижными. Магнитное поле создается только подвижными (движущимися) зарядами, а магнитных зарядов в природе не существует. Движущиеся заряды присутствуют в проводнике – это электрический ток. Давно замечено, что вокруг проводника металлические опилки выстраиваются в окружности. Это показывает, какой характер имеет магнитное поле – вихревой.

Магнитное поле – вид материи, которая распределена в пространстве. Поле (полевою материю) нельзя охарактеризовать в целом, можно охарактеризовать его в одной рассматриваемой точке или в некоторой области пространства. Магнитное поле в одной точке характеризуется такой величиной, как магнитная индукция или как напряженность магнитного поля (это связанные характеристики). Магнитное поле в некоторой области пространства характеризуют с помощью потока вектора магнитной индукции или потока вектора напряженности магнитного поля. Магнитное поле действует с силой на проводники с токами, заставляет их притягиваться или отталкиваться, поворачивает рамки с током, искривляет траекторию движения заряженных частиц. Электрическое поле способно только разгонять заряженные частицы и заставляет притягиваться или отталкиваться электрически заряженные тела. Электрическое поле в веществе только ослабляется, магнитное поле в веществе может, как ослабляться, так и усиливаться.

Какие законы обнаруживают в магнитном поле? Это прежде всего *закон Био-Савара-Лапласа*, позволяющий рассчитывать магнитную индукцию или напряженность магнитного поля в исследуемой точке. И *принцип суперпозиции*, который вместе с *законом Био-Савара-Лапласа* позволяет рассчитывать магнитную индукцию или напряженность магнитного поля, создаваемого проводниками с током (несколькими или разной геометрической конфигурации).

А также, такие законы поля, как *теорема Гаусса*, которая отражает тот факт, что силовые линии магнитного поля не могут начинаться и заканчиваться на зарядах (заряды равны нулю, магнитных зарядов не существует). Больше применение на практике по сравнению с теоремой Гаусса находит *теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля*, в ней отражен характер магнитного поля, оно, как уже сказано, имеет вихревой характер. К этим законам поля необходимо добавить уравнения связи между характеристиками поля.

Кроме перечисленных законов надо упомянуть законы, которые позволяют определить, с какой силой магнитное поле действует на движущийся заряд или проводник с током – это *закон (сила) Лоренца*, *закон (сила) Ампера*.

### Магнитное поле

Очень важно понимать то, что в природе существует единое электромагнитное поле, которое можно представить состоящим из двух полей – электрического и магнитного (ЭП или МП), при этом данные поля могут порождать друг друга.

*Магнитное поле (МП)* – это вид материи, распределенный в пространстве, обладающий следующими свойствами: 1) создается только движущимися зарядами; 2) оказывает силовое механическое воздействие только на движущиеся заряды; 3) создается переменным электрическим полем (~ЭП).

Необходимо знать, что магнитное взаимодействие на несколько порядков слабее кулоновского

$$F_M = \frac{V^2}{c^2} F_K$$

Здесь слева от знака равенства – сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд, справа – кулоновская сила, действующая на заряд (сила электрического поля), а дробь – это отношение квадратов скоростей: скорости движения заряда  $V$  и скорости света  $c$ . Как

правило скорости движения заряда далеки от скорости света, дробь всегда получается меньше единицы. То есть левая часть равенства составляет доли от правой части равенства.

### Основные характеристики МП

*Магнитная индукция* – физическая векторная величина, которая характеризует МП в исследуемой точке, она численно равна силе, с которой МП действует на единичный положительный заряд, движущийся с единичной скоростью в исследуемой точке МП:

$$B = \frac{F_{\max}}{q \cdot V}$$

**Первый вывод: не магнитная индукция МП зависит от скорости движения заряда, а сила, с которой магнитное поле будет на заряд действовать.**

Могут использовать и такие определения магнитной индукции:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l} \text{ – это магнитная индукция магнитного поля, численно равная}$$

силе, с которой МП действует на проводник единичной длины  $l$  с единичным током  $I$ .

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m} \text{ – это магнитная индукция магнитного поля, численно равная}$$

силе, с которой МП действует на контур единичной площади с единичным током  $I$  (здесь в знаменателе – магнитный момент, который равен произведению площади контура на силу тока, а в числителе – момент силы, действующий на контур с током).

Во всех трех определения магнитной индукции она численно равна силе, которая действует на единичный заряд/единичный ток, при этом если речь идет заряде, то он движется с единичной скоростью, если речь идет о проводнике, то он – единичной длины, если речь идет о контуре, то он – единичной площади. То есть, можно говорить, что магнитная индукция – силовая характеристика магнитного поля.

Единица измерения магнитной индукции  $[B] = 1 \text{ Тл (тесла)}$ .

Направление вектора  $\vec{B}$  в исследуемой точке определяют по правилу правого винта (по правилу буравчика, буравчик – это старинное устройство, которое использовали инженеры-железнодорожники). *Правило буравчика:*

Если поступательное движение буравчика (с правой винтовой резьбой) совпадает с направлением движения тока, то вращение ручки буравчика указывает направление силовых линий МП, которые имеют вид концентрических окружностей; вектор  $\vec{B}$  будет касателен к силовым линиям в исследуемой точке МП.

**Нарисуйте силовые линии магнитного поля, создаваемого проводником с током, который течет «к нам», а также для случая, когда ток течет «от нас». Изобразите на этих двух рисунках направления векторов магнитной индукции  $\vec{B}$  (см. интернет).**

Внимание! Формулы для определения магнитной индукции требуют измерения силы, действующей на заряд/проводник с током/ рамку с током, помещаемых в магнитное поле. Эти формулы не связывают магнитную индукцию с источником магнитного поля – движущимся (одним) зарядом или электрическим током (большим количеством движущихся зарядов). Ниже рассмотрим закон, который отражает связь магнитной индукции с источником магнитного поля. Тогда обнаружим и то, что величина магнитной индукции зависит от наличия магнетика – вещества, которое усиливает или ослабляет магнитное поле.

*Магнитный поток* – физическая скалярная величина, которая характеризует МП, пронизывающее некоторую поверхность, *магнитный поток* численно равен *потoku магнитной индукции*  $\vec{B}$  сквозь исследуемую поверхность  $S$  и определяется с помощью скалярного произведения вектора  $\vec{B}$  на вектор  $d\vec{S}$ :

$$\delta\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ – элементарный магнитный поток сквозь поверхность } dS ,$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ – магнитный поток сквозь поверхность } S .$$

Что такое вектор  $d\vec{S}$  ?

$$d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$$

$d\vec{S}$  – это вектор, который по модулю равен площади поверхности  $dS$ , а по направлению совпадает с нормалью к этой поверхности, то есть с вектором  $\vec{n}$ , который называют единичным вектором положительной нормали. При этом положительной считается нормаль, когда с острия этого вектора направление силовых линий или направление исследования МП наблюдается против часовой стрелки.

Единица измерения магнитного потока  $[\Phi] = 1$  Вб (вебер).

*Напряженность магнитного поля* – физическая векторная величина, которая характеризует магнитное поле в исследуемой точке, напряженность МП не зависит от наличия магнетика (вещества, которое усиливает или ослабляет магнитное поле), напряженность магнитного поля характеризует магнитное поле, создаваемое так называемыми макротоками (например, током проводимости), она численно равна:

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

**Найдите и запишите в конспект названия характеристик, входящих в определение напряженности МП (только названия! Проверить себя можно на следующей лекции «Магнитное поле в веществе»).**

Единица измерения *напряженности МП*  $[H] = 1$  А/м (ампер/на метр)

Существует связь между магнитной индукцией  $\vec{B}$  и напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$ :

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}.$$

#### Основные законы магнитного поля

1. *Закон Био-Савара-Лапласа.* Данный закон позволяет находить вектор  $\vec{B}$  в любой точке МП, если магнитное поле создается элементом проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$ :

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

Вектор  $d\vec{l}$  указывает направление тока, а радиус-вектор  $\vec{r}$  соединяет элемент проводника  $d\vec{l}$  с исследуемой точкой МП, в которой мы определяем магнитную индукцию.

Именно закон Био-Савара-Лапласа (закон БСЛ) отражает тот факт, что магнитная индукция зависит от силы тока (источника МП), и от расстояния между исследуемой точкой и проводником с током. Величина магнитной индукции зависит также от наличия магнетика – вещества, которое усиливает или ослабляет магнитное поле, за магнитные свойства в этом уравнении отвечает магнитная проницаемость вещества  $\mu$ .  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества, она характеризует магнитные свойства вещества, показывает во сколько раз магнитная индукция в веществе отличается от магнитного поля в вакууме (см. следующую лекцию «Магнитные свойства вещества»).

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная, она согласует математическое выражение с практическим значением магнитной индукции, которое получает магнитная индукция. Постоянные всегда выполняют такую роль – согласуют математические выражения со значениями величин.

Обобщим, что отражено в законе БСЛ: **магнитная индукция магнитного поля проводника с током зависит от величины силы тока, от расстояния между исследуемой точкой и проводником с током, а также от наличия магнетика.**

Направление вектора  $\vec{B}$  определяет результат векторного произведения  $d\vec{l}$  на  $\vec{r}$  и именно он порождает правило буравчика.

Физический смысл закона: **проводник с током создает магнитное поле.**

Еще одна форма закона Био-Савара-Лапласа – для магнитного поля, создаваемого зарядом  $q$ , движущимся со скоростью  $V$ :

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 \cdot dq[\vec{V}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

$d\vec{B}$  – магнитная индукция магнитного поля, создаваемого зарядом  $dq$ , движущегося со скоростью  $V$ . Маловероятно, что эта форма закона БСЛ

будет использована в вашей инженерной практике, поэтому знать о ней необходимо, но конспектировать данную форму не обязательно.

Переходим к частным случаям выражения закона Био-Савара-Лапласа. Обратите внимание, закон БСЛ в общем случае нет смысла учить и запоминать, главное – понять, от чего зависит магнитная индукция и как. А следующие формулы, полученные при интегрировании закона БСЛ для этих объектов, надо обязательно выучить, особенно первые две:

а) магнитное поле бесконечно прямолинейного проводника с током

$$B_A = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$$
 – магнитная индукция бесконечно прямолинейного проводника с током.

**Изобразите бесконечный прямолинейный проводник с током, силовые линии магнитного поля и обязательно изобразите вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  (см. интернет).**

б) магнитное поле в центре кругового тока

$$B_0 = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$$
 – магнитная индукция в центре кругового тока.

**Изобразите круговой ток и обязательно изобразите, как направлен вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  в центре кругового тока (см. интернет).**

в) магнитное поле отрезка проводника с током

$$B_A = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$
 – магнитная индукция отрезка проводника с

ТОКОМ.

**Изобразите отрезок проводника с током и обязательно изобразите вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  рядом с ним, указав, где будут указанные в формуле углы (см. интернет).**

2. *Принцип суперпозиции.* МП подчиняется принципу суперпозиции – если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то результирующее поле – это результат наложения МП отдельных токов или МП отдельных участков непрерывного тока:

$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$  - принцип суперпозиции для МП отдельных токов

$\vec{B} = \int d\vec{B}$  - принцип суперпозиции для МП непрерывного тока.

3. Теорема Гаусса для МП.

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Формулировка: поток вектора магнитной индукции сквозь произвольную замкнутую поверхность всегда равен нулю.

Физический смысл теоремы Гаусса: в природе не существует магнитных зарядов, силовые линии МП всегда замкнуты.

4. Теорема о циркуляции вектора напряженности МП:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{охв}$$

Формулировка: циркуляция вектора  $\vec{B}$  вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  равна произведению  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, пересекающих поверхность, ограниченную контуром  $L$ . Например, если поверхность пронизывают три тока, при этом два тока текут «к нам», а один – «от нас», то теорема запишется таким образом:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_2 + I_4 - I_3)$$

Положительным считают ток, если с острия вектора плотности тока обход вдоль контура  $L$  происходит против часовой стрелки.

Физический смысл теоремы: МП создается электрическим током (движущимися зарядами).

Поскольку силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, такое поле называют вихревым полем. Вихревое поле – это поле, силовые линии которого замкнуты.

Теорема о циркуляции магнитной индукции – это рабочая формула для расчета магнитного поля, например, соленоида. Однако, чаще ее записывают не для магнитной индукции, а для напряженности магнитного поля, в этом случае теорема имеет второе название – закон полного тока (не путайте с законом Ома для полной цепи):

$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{охв}}$  - расчетная формула магнитного поля, например для так

называемых магнитных цепей.

Рассмотрим для примера магнитную цепь в виде С-образного сердечника, у которого есть воздушный зазор длиной  $l_1$  и та часть, на которую намотаны проводники ( $l_2$ ). Для такого случая закон полного тока запишется  $H_1 l_1 + H_2 l_2 = \sum I_i$ .

5. *Сила Лоренца*. Сила Лоренца позволяет найти силу, с которой МП действует на движущиеся заряды.

$$\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}]$$

Сила Лоренца всегда перпендикулярна вектору скорости, а потому только искривляет траекторию движения частицы и создает только нормальное ускорение.

Формулировка: магнитное поле действует с силой на движущуюся заряженную частицу, при этом сила прямо пропорциональна произведению четырех величин – заряда, скорости заряда, магнитной индукции и синуса угла между вектором скорости и вектором магнитной индукции.

Физический смысл: магнитное поле действует с силой на движущуюся заряженную частицу.

Работа силы Лоренца всегда равна нулю  $\delta A = \vec{F} d\vec{r} = F dr \cos \alpha = 0$ , так как МП не ускоряет заряженную частицу, а только искривляет траекторию частицы.

Сила Лоренца по модулю равна:  $F = q \cdot V \cdot B \cdot \sin \alpha$

Где угол – это угол между вектором скорости  $V$  и вектором магнитной индукции  $B$ .

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии МП входили в ладонь, а четыре пальца совпадали с направлением движения заряженной (+) частицы, то отогнутый большой палец укажет направление максимальной силы Лоренца, действующей на положительную заряженную частицу.

Примеры движения заряженной частицы (меняется угол между векторами магнитной индукции и скорости):

1) Случай, когда  $\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{v}$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_L = qVB \sin 0^\circ = 0$$

Вывод: частица движется по инерции равномерно и прямолинейно вдоль силовых линий.

2) Случай, когда  $\vec{v} \perp \vec{B}$  или  $\sin \alpha 90^\circ = 1$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_L = qVB$$

Используем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_L = m\vec{a}_n$$

Подставим ускорение (нормальное) в уравнение:

$$F_L = \frac{mV^2}{R}$$

$$F_L = qVB$$

И получим радиус спирали по которой движется частица:

$$R = \frac{m}{q} \cdot \frac{V}{B}$$

$$\text{Или } \frac{mV}{R} = qB$$

Вывод: частица движется равномерно по окружности радиуса R.

3) Случай, когда  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  расположены под любым углом, например, под углом  $\alpha$  меньше  $90^\circ$ .

В этом случае движение частицы представляет собой наложение двух движений: равномерного движения вдоль силовых линий (см.п.1) и равномерного движения по окружности (перпендикулярно силовым линиям, (см.п.2)).

Проведем те же преобразования силы Лоренца и получим время и шаг винтовой линии, по которой движется заряд под действием магнитного поля:

$$\vec{F}_L = q[\vec{V}, \vec{B}] \quad F_L = qV_{\perp}B$$

$$V_n = V \cdot \cos \alpha \quad F_L = qV_{\perp}B$$

$$V_{\perp} = V \cdot \sin \alpha \quad F_L = m \frac{V^2}{R} \quad R = \frac{m}{q} \cdot \frac{V_{\perp}}{B}$$

$$R = \frac{m}{q} \cdot \frac{V \cdot \sin \alpha}{B} \text{ - радиус спирали}$$

$$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q}$$

Т.о., шаг винтовой линии – это скорость, умноженная на период.

$$h = V_{\perp} \cdot T = \frac{m}{q} \cdot \frac{2\pi}{B} \cdot V \cdot \cos \alpha$$

Вывод: движение заряда происходит по спирали, ось которой совпадает с силовыми линиями.

Общий вывод: Т.о., МП может только управлять движением заряженной частицы, но не может ускорять ее. Существуют инженерные сооружения, устройства, предназначенные для ускорения зарядов. Циклотрон - ускоритель заряженных частиц.

### Сила Ампера

Это сила, которая действует со стороны МП на проводник с током, помещенный в него.

Причина существования этой силы – свойство МП оказывать механическое силовое воздействие на движущиеся заряды.

Сила, действующая на элемент  $dl$  с током  $I$  МП с индукцией  $B$  численно равна

$$\boxed{d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}]} \text{ - закон Ампера}$$

Формулировка: магнитное поле действует с силой на проводник с током, при этом сила прямо пропорциональна произведению четырех величин – силы тока, длины проводника, магнитной индукции и синуса угла между вектором длины и вектором магнитной индукции.

Физический смысл: магнитное поле действует с силой на движущуюся заряженную частицу.

Проводник определенной длины

$$\vec{F} = I \int_L [d\vec{l}, \vec{B}]$$

Модуль силы Ампера  $dF = Idl \cdot B \cdot \sin \alpha$ ,  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ .

Максимальная сила Ампера будет в том случае, когда синус равен 1:

$$dF_{\max} = I \cdot dl \cdot B$$
$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}]$$

Именно из формул для силы Лоренца и силы Ампера и получаются формулы для определения магнитной индукции (см. выше)

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l} \quad B = \frac{F_{\max}}{q \cdot V}$$

Обратите внимание, если использовать определения скорости  $V = \frac{dl}{dt}$  и

силы тока  $I = \frac{dq}{dt}$ , можно из силы Ампера получить силу Лоренца  $\vec{F} = dq [\vec{V}, \vec{B}]$ .

Для определения направления силы Ампера применяют также правило левой руки *Правило левой руки* (см. силу Лоренца) получили при определении результата векторного произведения  $[d\vec{l}, \vec{B}]$

Особый случай силы Ампера – взаимодействие проводников с токами:

**Изобразите два проводника с токами и обязательно изобразите как направлены силы между ними (см. интернет).**

Сила Ампера, действующая со стороны второго проводника на первый, равна  $\vec{F}_{12} = I_1 [\vec{l}, \vec{B}_2]$ . При этом магнитная индукция магнитного поля второго

проводника равна  $B_2 = \frac{\mu\mu_0 I_2}{4\pi r}$ . Если записать силу по модулю и учесть, что угол между проводником и вектором магнитной индукции 90 градусов

$$F_{12} = I_1 \cdot l \cdot B_2 (\sin 90^\circ = 1)$$

Получим силу взаимодействия двух проводников с токами

$F_{12} = \frac{\mu\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{4\pi r} \cdot l$ , взаимодействие обусловлено существованием МП.

Чаще это уравнение делят на длину  $l$ , то есть определяют силу взаимодействия проводников на единицу длины:

$$F_l = \frac{\mu\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{4\pi r}$$

### Действие МП на замкнутый контур

Рассмотрим на следующей лекции.

Выводы:

1. МП создается движущимися зарядами и действует только на движущиеся заряды. МП создается движущимися зарядами, а следовательно, и проводником с током

2. Силовые линии МП всегда замкнуты.

3.. Магнитных зарядов в природе не существует (этот факт отражает теорема Гаусса для вектора магнитной индукции).

4. МП действует с силой на движущиеся заряды, но не ускоряет их, а только искривляет их траекторию (см. сила Лоренца). Отметим, что, если на движущийся заряд действуют одновременно ЭП и МП, то сила Лоренца должна учитывать и кулоновскую, и магнитную силы:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$

5. МП действует с силой не только на движущиеся заряды, но и на проводники с током (см. сила Ампера).