

## 11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

### Теоретический обзор к занятию 7.

**Темы: магнитное поле, его действие на заряды и токи, явление электромагнитной индукции.**

В ЕГЭ-2022 по физике темам этого занятия могут быть посвящены задания с №№ 15-19, № 24, № 26, № 28, № 29, то есть они в основном относятся к заданиям средней и высокой сложности по оценке составителей. Вместе с тем общий набор теоретических сведений по этим темам относительно невелик, но их применение требует четкого понимания физики явлений и доли пространственного воображения, так как для правильного их выполнения часто необходимо определить направление в пространстве токов, скоростей зарядов, индукции магнитного поля и возникающих сил.

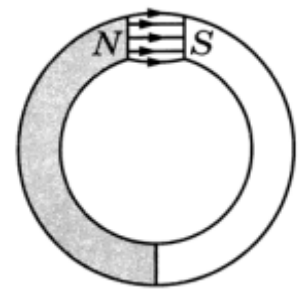
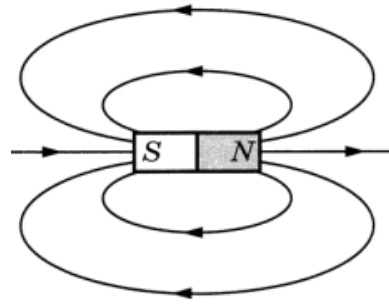
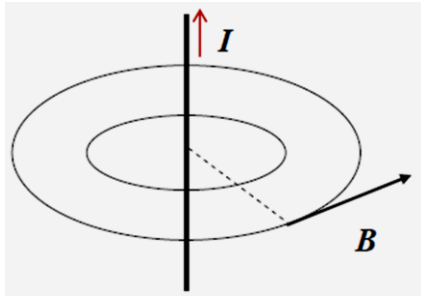
**Электромагнитное взаимодействие** – одно из фундаментальных взаимодействий, которое мы при описании разделяем на две компоненты: **электрическую** и **магнитную**. Изначально магнитное взаимодействие рассматривалось как взаимодействие между **постоянными магнитами** – кусками магнитных материалов. Позднее было обнаружено, что в магнитном взаимодействии участвуют проводники с током. Согласно **закону Ампера**, два параллельных проводника с током на расстоянии  $r$  притягиваются, если токи в них сонаправлены и отталкиваются при противоположном направлении токов, причем сила, действующая на участок длиной  $\Delta l$ , равна  $F_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l$ . Именно это явление было взято за основу

определения электрических единиц в СИ: одна из основных единиц СИ – единица силы тока 1 ампер – это сила тока, при которой сила взаимодействия участков параллельных проводов длиной 1 м с такими токами, находящихся на расстоянии в 1 м, равна  $2 \cdot 10^{-7}$  Н. Как видно, **магнитная постоянная** в СИ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>. Так как ток – это движение электрических зарядов, то это взаимодействие на самом деле является взаимодействием между движущимися зарядами.

**Магнитное взаимодействие** – это взаимодействие движущихся электрических зарядов, зависящее от их скорости. На самом деле при скоростях движения зарядов, малых по сравнению со скоростью света в вакууме это взаимодействие обычно является слабой поправкой к электрическому. Поэтому чаще всего оно играет важную роль именно при взаимодействии проводов с током: так как полный заряд проводника равен нулю (положительные заряды ионов решетки металла компенсируются отрицательными зарядов электронов проводимости), то электрическое взаимодействие проводов мало, и магнитное становится заметным. Точно также взаимодействие постоянных магнитов есть взаимодействие движущихся зарядов: электроны в атомах и молекулах вещества находятся в движении, и если эти движения на молекулярных масштабах становятся упорядоченными, то говорят, что в веществе присутствуют **элементарные токи**, и именно с ними связаны магнитные свойства материала.

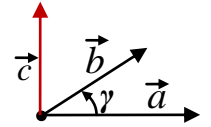
Магнитное взаимодействие двух линейных токов можно описать, считая, что каждый ток создает **магнитное поле**, силовые линии которого (**линии магнитной индукции**) – окружности в плоскости, перпендикулярной проводу, обходящие ток в положительном направлении (т.е. против часовой стрелки, если смотреть навстречу току – см. левый рисунок в таблице). Силовое действие поля описывается векторной величиной – магнитной индукцией  $\vec{B}$ . Для линейного тока вектор индукции направлен по касательной к линиям индукции и имеет величину  $B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$ , и это поле действует на параллельный ток с **силой Ампера**

$F_A = I B \Delta l$  (здесь ток и линии индукции взаимно перпендикулярны, а сила направлена перпендикулярно и току, и вектору индукции).



В векторной форме силу Ампера можно записать с помощью конструкции векторного произведения: на каждый элемент контура  $\Delta \vec{l}$  (этот вектор ориентирован по касательной к контуру в направлении тока) в поле с индукцией  $\vec{B}$  действует сила  $\vec{F}_A = I[\Delta \vec{l} \times \vec{B}]$ .

**Векторное произведение векторов:** согласно геометрическому определению, это вектор  $\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$  перпендикулярный  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , модуль которого равен  $|\vec{c}| = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin(\gamma)$  (нетрудно заметить, что численно модуль равен площади параллелограмма, построенного на перемножаемых векторах). Из двух возможных направлений перпендикуляра «правильное» выбирается так, чтобы поворот от  $\vec{a}$  к  $\vec{b}$  при взгляде «навстречу  $\vec{c}$ » был виден против часовой стрелки (обычно в математике именно такое направление поворота принимают за положительное). Интересная особенность векторного произведения – то, что оно меняет знак при перестановке сомножителей:  $[\vec{a} \times \vec{b}] = -[\vec{b} \times \vec{a}]$ . В действительности многие мнемонические правила выбора направлений в физике (правило левой руки, правило буравчика и т.д.) связаны именно с определением направления векторного произведения.



**Магнетики** (вещества, в которых на молекулярном уровне текут заметные упорядоченные токи) способны усиливать или ослаблять поле за счет того, что токи в присутствии внешнего поля становятся еще более упорядоченными – говорят, что в магнетике возникает внутренняя намагниченность. Этот эффект описывают, заменяя в формулах для магнитного поля  $\mu_0$  на  $\mu_0 \cdot \mu$ , где  $\mu$  называют *относительной магнитной проницаемостью*, а  $\mu_0$  – *магнитной проницаемостью вакуума*.

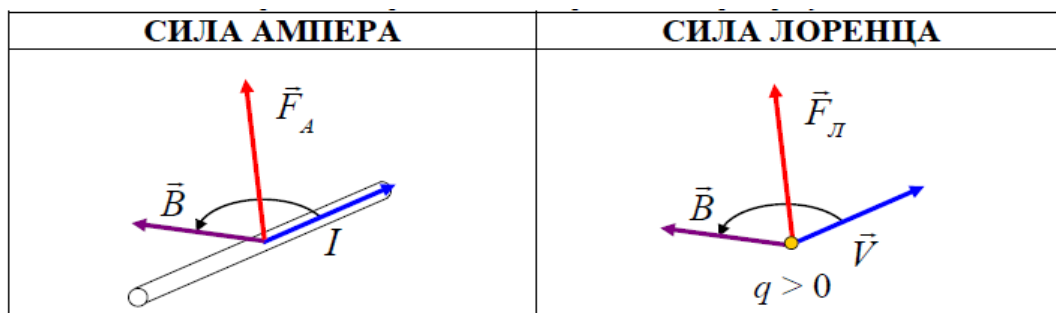
Из источников магнитного поля в школьном курсе рассматривают постоянные магниты (изготовленные из магнетика с очень большой магнитной проницаемостью, способного длительное время сохранять остаточную намагниченность после выключения намагничивающего поля – выше на рисунках в таблице в центре и справа схематично показана картина линий индукции полосового и тороидального магнита) и контура с током.

Отметим, что полная сила Ампера, действующая на **замкнутый** контур в **однородном** магнитном поле, равна нулю, но при этом суммарный момент таких сил оказывается ненулевым – силы Ампера стремятся развернуть контур.

На самом деле сила Ампера есть равнодействующая всех сил, действующих на движущиеся заряженные частицы – носители зарядов в проводниках. Сила, действующая на один заряд, движущийся со скоростью  $\vec{v}$  – **сила Лоренца**  $\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ . Поскольку сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости, то ее работа при любом перемещении заряда равна нулю. Таким образом, сила Лоренца не может изменить кинетическую энергию частицы – если других сил нет, то, независимо от конфигурации постоянного магнитного поля скорость движущегося в нем заряда меняется только по направлению, но не по величине.

Для заданий ЕГЭ важно знать это свойство магнитного поля и уметь описывать движение заряженных частиц в однородном магнитном поле (см. ниже).

Важно уметь четко определять направление силы Ампера или силы Лоренца в каждом конкретном случае.



Те, кто знаком с конструкцией векторного произведения (с помощью которой выше были записаны формулы для этих сил), могут использовать ее. Можно использовать и мнемонические правила. Конкретное направление перпендикуляра можно определить с помощью любого из «правил».

Например, можно использовать «правило левой руки»: «Если расположить левую руку так, чтобы пальцы были направлены по току (по скорости заряда), а линии индукции магнитного поля входили в ладонь, то отогнутый под прямым углом большой палец кажет направление силы Ампера (Лоренца)», или «правило правой ноги»: «Если сесть, положив правую ногу на вектор скорости заряда (вектор, направленный вдоль тока), а левую – на вектор магнитной индукции, то туловище укажет направление силы Лоренца (Ампера)», и любое другое – важно одно из них научиться применять четко, ибо нередко правильность решения задачи ЕГЭ зависит от правильности определения направления силы Ампера либо силы Лоренца.

В заданиях ЕГЭ встречаются: задачи на равновесие контура в магнитном поле при учете действия силы Ампера; задачи о движении проводников в магнитном поле при учете действия силы Ампера; задачи о движении заряженных тел в магнитном поле при учете действия силы Лоренца.

В однородном постоянном магнитном поле можно выделить два характерных движения заряженных тел:

1) равномерного движения со скоростью  $v_{\parallel}$  вдоль направления  $\vec{B}$ : если скорость тела направлена вдоль индукции поля, то сила Лоренца равна нулю, и в отсутствие других сил тело движется с постоянной скоростью.

2) равномерного вращения по окружности радиуса  $R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$  с угловой скоростью  $\omega = \frac{qB}{m}$  в

плоскости, перпендикулярной  $\vec{B}$ : если тело влетает в магнитное поле перпендикулярно индукции, то его скорость меняться не будет, а сила Лоренца (и вместе с ней ускорение тела) перпендикулярны скорости. Поэтому такое движение будет равномерным вращением, и связь

радиуса траектории со скоростью находится из уравнения движения:  $m \frac{v_{\perp}^2}{R} = qv_{\perp} B$ .

Если есть еще и другие силы, то нужно решать механическую задачу о движении тела под действием результирующих всех сил. Важный пример – это «скрещенные» поля, когда сила

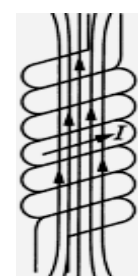
$\vec{F}$  другой природы (со стороны электрического либо гравитационного поля) **перпендикулярна** вектору магнитной индукции. В этом случае при движении частицы в направлении, перпендикулярном и вектору индукции, и дополнительной силе, со скоростью

$u = \frac{F}{qB}$ , при одном из направлений движения сила Лоренца в точности сокращает  $\vec{F}$ , и

частица движется равномерно-прямолинейно!

Среди контуров с током, магнитные поля которых рассматриваются в ЕГЭ, особое место занимают катушки индуктивности.

**Катушка индуктивности (соленоид)** – провод, намотанный витками на сердечник (обычно из магнетика). При пропускании тока  $I$  внутри соленоида длиной  $l$ , на который намотано  $N$  витков, создается почти однородное магнитное поле



$$B = \mu_0 \mu \frac{N}{l} I.$$

Магнитное поле в некоторой области пространства часто характеризуют еще одной величиной, называемой *магнитным потоком*. Магнитный поток через поверхность в общем случае определяется как интеграл (сумма большого числа очень малых вкладов): нужно разбить поверхность на бесконечно малые элементы  $\Delta S$ , ввести для каждого из них вектор «внешней» нормали  $\vec{n}$  (то есть вектор, перпендикулярный этому участку, направленный «наружу») и вычислить величину  $\Delta\Phi \equiv (\vec{B} \cdot \vec{n})\Delta S = |\vec{B}| \Delta S \cos(\alpha)$  ( $\alpha$  – угол между вектором индукции и внешней нормалью). Полный поток равен сумме вкладов всех элементов поверхности. Как и в случае электростатического поля, потоку можно придать «геометрический» смысл как величины, пропорциональной «количеству» линий индукции, пересекающих поверхность. Поскольку линии индукции всегда замкнуты (ввиду отсутствия экспериментальных данных о магнитных зарядах считаем, что их не существует), то очевидно, что магнитный поток через замкнутую поверхность всегда равен нулю. Понятие магнитного потока играет важную роль в описании явления электромагнитной индукции (см. ниже). Рассмотрим в качестве примера поле соленоида. Магнитный поток через каждый виток соленоида площадью  $S$  равен  $B \cdot S$ , а полный поток через соленоид  $\Phi = \mu_0 \mu N^2 \frac{S}{l} I \equiv L \cdot I$ .

Величина  $L$ , равная отношению магнитного потока через контур к току в нем, называется **индуктивностью** (или коэффициентом самоиндукции). Как видно из примера с соленоидом, индуктивность зависит от геометрических параметров контура и свойств сердечника. **Энергия катушки индуктивности**, запасенная в виде магнитного поля, равна  $E_L = \frac{LI^2}{2}$ . Это соотношение очень важно, так как используется в решении многих заданий ЕГЭ.

Постоянные электрическое и магнитное поля могут рассматриваться независимо. Ситуация меняется при рассмотрении переменных полей. В этом случае проявляется их общая природа – переменные магнитные поля порождают электрическое поле, переменные электрические поля порождают магнитное поле. Особенность порождаемого вследствие этого взаимовлияния электрического поля – то, что оно является *вихревым* (его силовые линии **замкнуты** – напомним, что силовые линии электростатического поля идут от положительных зарядов к отрицательным). Вихревое электрическое поле совершает работу по перемещению зарядов по замкнутому проводящему контуру, то есть играет роль ЭДС. Величина ЭДС вычисляется в соответствии с **законом электромагнитной индукции Фарадея**: при изменении магнитного потока через контур в нем наводится ЭДС индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока:  $E_i = - \frac{d\Phi}{dt}$ . Знак минус в этом соотношении выражает **правило Ленца**:

направление индукционного тока таково, что он своим полем стремится скомпенсировать изменение магнитного потока. Замечательно, что закон Фарадея определяет значение ЭДС индукции независимо от конкретной причины, вызвавшей изменение магнитного потока – изменение величины магнитного поля, изменение площади контура или изменение угла между  $\vec{B}$  и нормалью к контуру (вращение контура).

Если в контуре изменяется ток, то изменяется и магнитный поток через него от поля самого этого тока. Значит, в контуре с переменным током обязательно наводится ЭДС **самоиндукции**. Для большинства «обычных» контуров с током эта ЭДС существенно меньше ЭДС источников тока, включенных в контур, и тогда эффектом самоиндукции можно пренебречь (так часто и рекомендовано в задачах о движении проводника в магнитном поле). Однако для контуров с большой индуктивностью и малым сопротивлением, или для контуров в магнитном поле без внешней ЭДС, явление самоиндукции необходимо учитывать. Нетрудно заметить, что ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока. Например, для катушки индуктивности  $E_i = - \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$ .

Явление электромагнитной индукции используется в устройстве для преобразования переменных токов – трансформаторе. Он представляет собой две «обмотки» (катушки индуктивности) с магнитной связью (обычно они надеты на один сердечник из материала с большой магнитной проницаемостью). **Идеальный трансформатор** без потерь характеризуется коэффициентом трансформации, равным отношению числа витков во «вторичной» (выходной) и «первичной» (входной) обмотках  $k \equiv \frac{N_2}{N_1}$ . В таком трансформаторе

**амплитуды** напряжений на обмотках и токов в них связаны соотношениями:  $U_2 = k \cdot U_1$  и  $I_2 = \frac{1}{k} \cdot I_1$  (как видно,  $U_2 I_2 = U_1 I_1$  – это равенство выражает закон сохранения энергии в

отсутствие потерь). Если потери есть, то их влияние можно описать, вводя коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора  $\eta \equiv \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$ . Ясно, что для идеального трансформатора  $\eta = 100\%$ , а для трансформаторов с потерями  $\eta < 100\%$ .

В материалах ЕГЭ встречаются два типа задач по этой теме: задачи на вычисление ЭДС индукции, индукционного тока, протекшего заряда – решаются с использованием закона Фарадея и закона Ома; задачи о влиянии индукции на движение проводников в магнитном поле – здесь надо совместно использовать закон Фарадея, закон Ома и уравнение движение с учетом силы Ампера.