ПГУТИ

ЛЕКЦИИ

по физике 1 семестр

Арсеньев А.Н.

01.04.2016

Краткий конспект лекций для студентов заочного дистанционного обучения

Оглавление

Лекция 1. Кинематика 5
§1: Кинематика поступательного движения. 5
Скалярное произведение. 6
Примеры: 8
§2: Кинематика вращательного движения. 9
Векторное произведение 9
Примеры: 10
Вопросы для самопроверки 11
Лекция 2. Динамика 12
§1. Законы Ньютона 12
Первый закон (закон инерции). 12
Принцип Галилея. 12
Сила. Масса. Второй закон Ньютона. 12
Второй закон Ньютона. 13
Третий закон Ньютона. Границы применимости законов Ньютона. 14
Третий закон Ньютона. 14
Границы применимости законов Ньютона. 14
§2. Силы в природе 14
Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Вес тела. 14
Ускорение свободного падения. 15
Примеры: 15
Сила упругости. Закон Гука. 16
Закон Гука. 16
Сила трения. 16
Силы инерции. 17
Вопросы для самопроверки 18
Лекция 3. Законы сохранения. 18
§1. Закон сохранения импульса. 18
Закон сохранения импульса. 19
Центр масс. 19
§2. Закон сохранения механической энергии. 20
Работа. Энергия. 20
Механическая работа. 20
Примеры: 21
Пример: 23
Закон сохранения и изменения полной механической энергии. 23

Закон сохранения механической энергии. ... 23
Вопросы для самопроверки ... 24
Лекция 4. Динамика вращательного движения. ... 24
Вопросы для самопроверки ... 26
Лекция 5. Электростатика ... 26
§1: Напряженность электростатического поля. Теорема Гаусса. ... 26
Два вида электрических зарядов. Закон сохранения электрического заряда. ... 26
Закон сохранения электрического заряда – один из фундаментальных законов природы. ... 27
Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции. ... 27
Закон Кулона ... 27
Теорема Гаусса. ... 28
Поток вектора напряженности электростатического поля ... 28
Теорема Гаусса. ... 29
Применение теоремы Гаусса. ... 30
§2: Электростатическое поле в проводниках и диэлектриках. ... 33
Диэлектрическая проницаемость ... 35
Теорема Гаусса для диэлектриков. ... 35
Теорема Гаусса для диэлектриков. ... 36
§3: Потенциал электростатического поля. Принцип суперпозиции. ... 37
Потенциал ... 38
Примеры: ... 38
Принцип суперпозиции для потенциалов ... 41
§4: Связь между напряженностью и разностью потенциалов электростатического поля. Граничные условия. ... 41
Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля. ... 42
Граничные условия. ... 42
§5: Электроемкость. Конденсаторы. ... 43
Примеры: ... 43
Емкость при последовательном и параллельном соединении конденсаторов. ... 44
Энергия конденсатора. ... 44
Плотность энергии электростатического поля. ... 45
Вопросы для самопроверки ... 45
Лекция 6. Законы постоянного тока ... 46
Необходимое условие существования тока: ... 46
Закон Ома. ... 46

Зависимость сопротивления от материала и геометрических размеров проводника. 47
Зависимость сопротивления от температуры. 47
Явление сверхпроводимости. 47
Последовательное и параллельное соединение проводников. 47
Закон Ома в дифференциальной форме. 48
Простейшая микроскопическая теория электрического тока. 48
Закон Джоуля - Ленца. Работа и мощность тока. 49
Сторонние силы. ЭДС. 50
Закон Ома для неоднородного участка цепи и для замкнутой цепи. 51
Закон Ома для замкнутой цепи 51
Правила Кирхгофа. 52
Первое правило Кирхгофа 52
Второй закон Кирхгофа. 53
Пример. 53
Вопросы для самопроверки 54
Лекция 7. Электромагнитные явления 54
§1: Индукция магнитного поля 54
§2: Закон Био-Савара- Лапласа 55
Примеры: 56
Принцип суперпозиции для индукции магнитного поля. 59
§3: Напряженность магнитного поля. Магнитные свойства вещества. Граничные условия. 59
Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. 61
Теорема Гаусса для вектора индукции магнитного поля. 61
Граничные условия для магнитного поля. 61
§4: Сила Ампера. Сила Лоренца. 62
Движение заряженной частицы в магнитном поле. 63
§5. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Явление самоиндукции. 64
Математическое отступление. 65
Закон Фарадея. 65
Пример: 65
Правило Ленца. 65
Примеры: 65
Две природы ЭДС – индукции. 66
Обобщение закона Фарадея. 66
Явление самоиндукции. 67
Индуктивность соленоида бесконечных размеров. 68

Энергия магнитного поля в катушке индуктивности с током. .. 68
Плотность энергии магнитного поля. 68
§6. Уравнения Максвелла.. 68
§7. Система дифференциальных уравнений классической электродинамики 70
Вопросы для самопроверки 70
Глоссарий 71
Предметный указатель.. 79
Список литературы 80
Основная литература 80
Дополнительная литература 81

Лекция 1. Кинематика

§1: Кинематика поступательного движения.

При поступательном движении все точки тела движутся одинаково, и любой отрезок, проведенный внутри тела, остается параллельным первоначальному направлению.

Основным понятием механики и кинематики является материальная точка.

Материальная точка - это тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

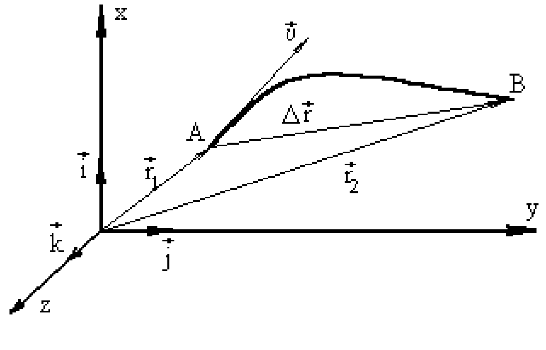
Тело отсчета это тело, относительно которого определяется положение в пространстве других тел.

Система отсчета это тело отсчета, жестко связанная с ним система координат и прибор для измерения времени (в системе СИ время измеряется в секундах).

Траектория это линия, вдоль которой двигается тело (материальная точка).

Путь это длина траектории (в системе СИ путь измеряется в метрах).

Радиус-вектор это вектор, соединяющий начало координат (отсчета) и точку, где находится тело.



Введем единичные вектора (орты), задающие направления координатных осей.

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

Перемещение это вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела.

$\Delta\vec{r} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k}$

Вектора это направленные отрезки, которые складываются по правилу параллелограмма или треугольника.

Как правило, путь больше или равен перемещению.

$\Delta r \le S$

Знак равенства возможен при прямолинейном движении и при движении за бесконечно малый промежуток времени.

Скорость это вектор, равный перемещению тела за единицу времени. Скорость бывает средняя и мгновенная.

Средняя скорость это скорость, определяемая за конечный промежуток времени.

$$\vec{\upsilon}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}$$

В системе СИ: $[\upsilon] = \left[\frac{м}{с}\right]$. Вектор скорости всегда направлен по касательной к траектории.

$$\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}\right) = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

$$\upsilon_x = \frac{dx}{dt} \quad \upsilon_y = \frac{dy}{dt} \quad \upsilon_z = \frac{dz}{dt}$$

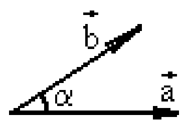
Здесь $\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z$ - проекции вектора $\vec{\upsilon}$ на соответствующие оси.

$$\vec{\upsilon} = \upsilon_x\vec{i} + \upsilon_y\vec{j} + \upsilon_z\vec{k}$$

Скалярное произведение.

$$a = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k} \quad b = b_x\vec{i} + b_y\vec{j} + b_z\vec{k}$$

$$\left(\vec{a} \cdot \vec{b}\right) = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot Cos\alpha$$



$$a = |\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad b = |\vec{b}| = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}$$

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

$$\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

$$d\vec{r} = \vec{\upsilon}dt$$

$$\int_{r_0}^{r} d\vec{r} = \int_0^t \vec{\upsilon}dt$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{\upsilon}dt \quad x = x_0 + \int_0^t \upsilon_x dt \quad y = y_0 + \int_0^t \upsilon_y dt \quad z = z_0 + \int_0^t \upsilon_z dt$$

$$\upsilon = \frac{ds}{dt} \approx \frac{dr}{dt} \; (\Delta t \to 0 \Rightarrow \Delta r \approx \Delta s)$$

$$s = \int_0^t \upsilon dt$$

Ускорение это вектор, равный изменению вектора скорости за единицу времени. Ускорение бывает среднее и мгновенное. Среднее ускорение это ускорение, определяемое за конечный промежуток времени. Мгновенное ускорение это ускорение, определяемое за бесконечно малый промежуток времени. В системе СИ: $[a] = \left[\frac{м}{с}\right]$.

$$\vec{a}_{ср} = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t}$$

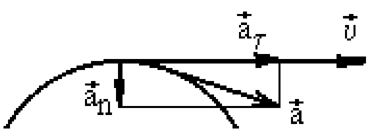
$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dot{\vec{\upsilon}}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\upsilon_x\vec{i} + \upsilon_y\vec{j} + \upsilon_z\vec{k}\right) = \frac{d\upsilon_x}{dt}\vec{i} + \frac{d\upsilon_y}{dt}\vec{j} + \frac{d\upsilon_z}{dt}\vec{k}$$

$$a_x = \frac{d\upsilon_x}{dt} \quad a_y = \frac{d\upsilon_y}{dt} \quad a_z = \frac{d\upsilon_z}{dt}$$

Здесь a_x, a_y, a_z - проекции вектора $\vec{a}$ на соответствующие координатные оси.

$$\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k}$$



Тангенциальное ускорение это проекция вектора ускорения на вектор скорости. Тангенциальное ускорение описывает изменение скорости по модулю.

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}$$

Нормальное ускорение это проекция вектора ускорения на ось, перпендикулярную вектору скорости. Нормальное ускорение описывает изменение скорости по направлению.

$a_н = \frac{\upsilon^2}{R}$, где R – радиус кривизны траектории.

$$a = \sqrt{a_н^2 + a_\tau^2}$$

Малый отрезок кривой можно представить как дугу окружности.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}$$

$$d\vec{\upsilon} = \vec{a}dt$$

$$\int_{\upsilon_0}^{\upsilon} d\vec{\upsilon} = \int_0^t \vec{a}dt$$

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \int_0^t \vec{a}dt \quad \upsilon_x = \upsilon_{0x} + \int_0^t a_x dt \quad \upsilon_y = \upsilon_{0y} + \int_0^t a_y dt \quad \upsilon_z = \upsilon_{0z} + \int_0^t a_z dt$$

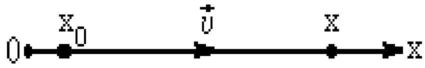
$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}$$

$$\upsilon = \int_0^t a_\tau dt$$

<u>Примеры:</u>

1. Равномерное прямолинейное движение $(\upsilon = \text{const})$.

Выберем ось x вдоль направления движения. Тогда y и z не нужны (y=0, z=0).



$$a = 0$$

$$\upsilon = \upsilon_x = \text{const}$$

$$x = x_0 + \int_0^t \upsilon_x dt = x_0 + \upsilon_x \int_0^t dt = x_0 + \upsilon_x t$$

$$s = x - x_0 = \upsilon_x t$$

$$\upsilon_x = \frac{s}{t} = \frac{x - x_0}{t}$$

2. Равноускоренное прямолинейное движение $(a = a_x = \text{const})$.

Выберем ось x вдоль направления движения (y=0, z=0).

$$\upsilon_x = \upsilon_{0x} + \int_0^t a_x dt = \upsilon_{0x} + a_x \int_0^t dt = \upsilon_{0x} + a_x t$$

$$a_x = \frac{\upsilon_x - \upsilon_{0x}}{t}$$

$$x = x_0 + \int_0^t \upsilon_x dx = x_0 + \int_0^t (\upsilon_{0x} + a_x t)dt = x_0 + \upsilon_{0x} \int_0^t dt + a_x \int_0^t tdt = x_0 + \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$$s = x - x_0 = \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

3. $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$

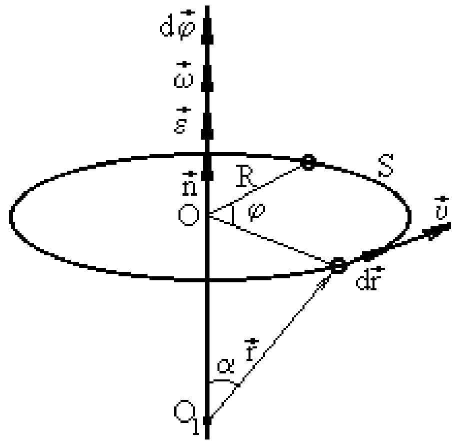
$$x_0 = A$$

$$\upsilon_x = \dot{x} = B + 2Ct + 3Dt^2$$

$$a_x = \dot{\upsilon}_x = 2C + 6Dt$$

§2: Кинематика вращательного движения.

При вращательном движении вокруг неподвижной оси все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на оси.



Пусть φ это угол поворота по окружности за время t. Угол вектором не является, но угол поворота dφ за бесконечно малый промежуток времени dt можно рассматривать как вектор, направленный вдоль оси вращения. Бесконечно малые углы с точностью до бесконечно малой величины можно складывать как вектора. Направление вращения и направление $d\vec{\varphi}$ связаны правилом буравчика.

Угловая скорость это вектор, направленный вдоль оси вращения и равный по модулю углу поворота за единицу времени. В системе СИ: $[\omega]=\left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$.

$$\vec{\omega}=\frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$

Направление вращения и $\vec{\omega}$ связаны правилом буравчика.

Угловое ускорение это вектор, направленный вдоль оси вращения и равный по модулю изменению угловой скорости за единицу времени. В системе СИ: $[\varepsilon]=\left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}\right]$.

$$\vec{\varepsilon}=\frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Если $\vec{\varepsilon}\uparrow\uparrow\vec{\omega}$ - движение ускоренное.

Если $\vec{\varepsilon}\uparrow\downarrow\vec{\omega}$ - движение замедленное.

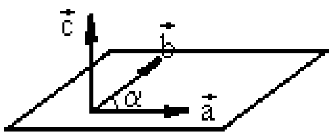
$\vec{n}$ - единичный вектор, задающий направление оси вращения.

$$d\vec{\varphi}=d\varphi\cdot\vec{n}$$

$$\vec{\omega}=\frac{d\varphi}{dt}\cdot\vec{n}$$

$$\vec{\varepsilon}=\frac{d\omega}{dt}\cdot\vec{n}$$

<u>Векторное произведение</u>



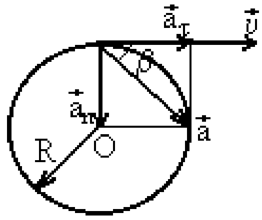
$$\vec{c}=\left[\vec{a}\times\vec{b}\right]$$

$\vec{c}$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат $\vec{a}$ и $\vec{b}$. $\vec{a},\vec{b},\vec{c}$ образуют правую тройку векторов. $\vec{c}\perp\vec{a}$, $\vec{c}\perp\vec{b}$.

$c = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \mathrm{Sin}\,\alpha$

$\vec{a} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k} \quad \vec{b} = b_x\vec{i} + b_y\vec{j} + b_z\vec{k} \quad \vec{c} = c_x\vec{i} + c_y\vec{j} + c_z\vec{k}$

$$\vec{c} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y)\vec{i} + (a_z b_x - a_x b_z)\vec{j} + (a_x b_y - a_y b_x)\vec{k} = c_x\vec{i} + c_y\vec{j} + c_z\vec{k}$$



$d\vec{r} = [d\vec{\varphi} \times \vec{r}]$

$dr = d\varphi \cdot r\mathrm{Sin}\,\alpha = d\varphi \cdot R$

$\vec{\upsilon} = \dfrac{d\vec{r}}{dt} = \dfrac{d[d\vec{\varphi} \times \vec{r}]}{dt} = \left[\dfrac{d\vec{\varphi}}{dt} \times \vec{r}\right] = [\vec{\omega} \times \vec{r}]$

$\upsilon = \omega r\mathrm{Sin}\,\alpha = \omega R$

$\vec{a} = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \dfrac{d}{dt}[\vec{\omega} \times \vec{r}] = \left[\dfrac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r}\right] + \left[\vec{\omega} \times \dfrac{d\vec{r}}{dt}\right] = [\vec{\varepsilon} \times \vec{r}] + [\vec{\omega} \times \vec{\upsilon}] = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$

$a_\tau = \varepsilon r\mathrm{Sin}\,\alpha = \varepsilon R$

$a_n = \omega\upsilon\mathrm{Sin}\,90° = \omega\upsilon = \omega^2 R = \dfrac{\upsilon^2}{R}$

$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$

$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} = \sqrt{\varepsilon^2 R^2 + \omega^4 R^2} = R\sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4}$

<u>Примеры:</u>

1. $\varphi = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$

$\omega = \dot{\varphi} = B + 2Ct + 3Dt^2$

$\varepsilon = \dot{\omega} = 2C + 6Dt$

2. $s = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$

Если $s = f(t)$ - монотонно возрастает: $\varphi = \dfrac{s}{R}$.

3. Равномерное вращение по окружности (R=const).

$\varepsilon = 0,\ \omega = \mathrm{const}$

$\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$

$d\varphi = \omega dt$

$\int_0^\varphi d\varphi = \int_0^t \omega dt$

$\varphi = \omega t \quad \omega = \dfrac{\varphi}{t}$

4. Равноускоренное вращение по окружности $(\varepsilon = \mathrm{const},\ \omega_0 = 0)$.

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$$

$$d\omega = \varepsilon dt$$

$$\int_0^{\omega} d\omega = \int_0^{t} \varepsilon dt$$

$$\omega = \varepsilon t \quad \varepsilon = \frac{\omega}{t}$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

$$d\varphi = \omega dt$$

$$\int_0^{\varphi} d\varphi = \int_0^{t} \omega dt = \int_0^{t} \varepsilon t dt$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

5. Равноускоренное вращение по окружности $(\varepsilon = \mathrm{const}, \omega_0 \neq 0)$.

$$d\omega = \varepsilon dt$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \int_0^{t} \varepsilon dt$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

$$d\varphi = \omega dt$$

$$\int_0^{\varphi} d\varphi = \int_0^{t} \omega dt = \int_0^{t} (\omega_0 + \varepsilon t) dt$$

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

Вопросы для самопроверки

1. Определение основных понятий кинематики вращательного движения: угол поворота в радианах, угловая скорость, угловое ускорение. Единицы их измерения

2. Как зависят от времени путь и скорость при равноускоренном движении.

3.Определение основных понятий кинематики вращательного движения: угол поворота в радианах, угловая скорость, угловое ускорение. Единицы их измерения.

4.Какова связь между линейными и угловыми кинематическими величинами при движении по окружности.

5. Как зависят от времени угол поворота и угловая скорость при равноускоренном вращении.

Лекция 2. Динамика

§1. Законы Ньютона

Законы Ньютона – обобщение экспериментальных данных.

Первый закон (закон инерции).

Существуют такие системы отсчета (инерциальные), относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерно прямолинейно движется, если на него не действуют другие тела или их действие взаимно скомпенсировано.

Инерциальные системы отсчета (ИСО) это такие системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона. В рамках достигнутой к настоящему времени точности измерений, системы отсчета, связанные с Солнцем и неподвижными относительно Солнца звездами, можно считать ИСО. Системы отсчета, связанные с Землей, в ряде задач можно считать ИСО приблизительно. Любая система отсчета, которая двигается равномерно и прямолинейно относительно ИСО, также является ИСО.

Принцип Галилея.

Никакими механическими опытами нельзя определить движется ИСО или покоится. Все ИСО равноправны.

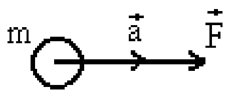
В неинерциальных системах отсчета (НИСО) тело может иметь ускорение без видимых на то причин, то есть без взаимодействия.

Инерция это свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения при отсутствии внешних воздействий или их взаимной компенсации.

Сила. Масса. Второй закон Ньютона.

Инертность это свойство тела изменять свою скорость при взаимодействии не мгновенно, а за конечный промежуток времени.

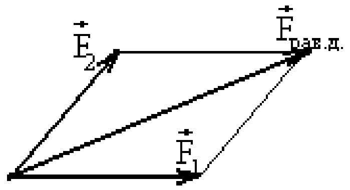
Масса это количественная мера инертности тела. Чем больше масса, тем медленнее тело изменяет свою скорость при взаимодействии. В системе СИ: $[m]=[кг]$.



Причиной ускорения тела является взаимодействие тел.

Сила это векторная величина, которая является мерой взаимодействия тел. Вектор силы направлен вдоль ускорения, приобретаемого телом под действием силы. По модулю сила равна произведению массы тела на модуль его ускорения. В системе СИ: $[F]=[Н]=\left[\frac{кг\cdot м}{с^2}\right]$.

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



Равнодействующая сила это вектор, равный векторной сумме сил, приложенных к телу.

$$\vec{F}_{рав.д.} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

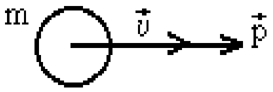
Второй закон Ньютона.

1. Произведение массы тела на вектор его ускорения равно векторной сумме сил, приложенных к телу (равнодействующей силе).

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = \vec{F}_{рав.д.}$$

2. Вектор ускорения тела прямо пропорционален вектору равнодействующей силы и обратно пропорционален массе тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{рав.д.}}{m}$$



Импульс тела это вектор, равный произведению массы тела на вектор его скорости. В системе СИ: $[p] = \left[\frac{кг \cdot м}{с}\right]$.

$$\vec{p} = m\vec{\upsilon}$$

Импульс силы это вектор, равный произведению вектора силы на время ее действия. В системе СИ: $[Ft] = [Н \cdot с] = \left[\frac{кг \cdot м}{с}\right]$.

3. Изменение импульса тела равно импульсу равнодействующей силы.

$$m\vec{a} = \vec{F}_{рав.д.}$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}$$

$$m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \frac{d}{dt}m\vec{\upsilon} = \vec{F}_{рав.д.}$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{рав.д.} = \vec{F}_1 + ... + \vec{F}_n$$

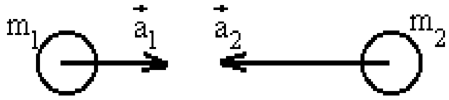
$$d\vec{p} = \vec{F}_{рав.д.}dt$$

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + \int_0^t \vec{F}_{рав.д.}dt$$

Третья формулировка является наиболее общей формулировкой второго закона Ньютона и справедлива, даже если масса переменная.

Третий закон Ньютона. Границы применимости законов Ньютона.

Рассмотрим взаимодействие двух тел. Опыт показывает, что оба тела приобретают ускорения, направленные в противоположные стороны. Мо-



дуль ускорения обратно пропорционален массе тел.

$$\vec{a}_1 \uparrow\downarrow \vec{a}_2$$

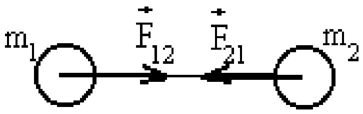
$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

$$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Третий закон Ньютона.

Силы, с которыми взаимодействуют два тела, равны по модулю и противоположны по направлению (сила действия равна по модулю и про-



тивоположна силе противодействия).

Силы $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$ приложены к разным телам. Складывать их нельзя. Можно складывать силы, приложенные к одному телу.

Границы применимости законов Ньютона.

Законы Ньютона не справедливы если:

1. Скорость тела сравнима со скоростью света (в этом случае справедлива специальная теория относительности).

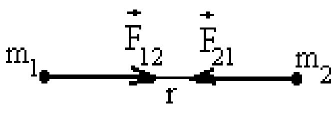
2. Размеры тела малы и сравнимы с атомными размерами порядка 10^{-10} м (в этом случае справедлива квантовая механика).

3. Массы тел сравнимы со звездными массами (в этом случае справедлива общая теория относительности).

§2. Силы в природе

Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Вес тела.

Две материальные точки притягиваются с силой, пропорциональной произведению масс точек и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.



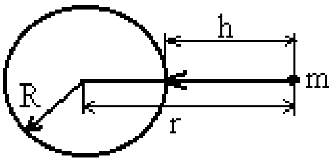
$$F_{12} = F_{21} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Н \cdot м^2}{кг^2}$$

Силы тяжести направлены вдоль прямой, соединяющей центры масс тел и приложены к центрам масс.

Данная форма закона всемирного тяготения справедлива также для тел, имеющих форму сфер или шаров. При этом предполагается, что массы тел сосредоточены в центре сфер или шаров (r – расстояние между центрами сфер или шаров).

Ускорение свободного падения.



$$\vec{F}_Т = G\frac{Mm}{r^2}$$

$$g = \frac{\vec{F}_Т}{m}$$

$$r^2 = (R+h)^2$$

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2} = \frac{GM}{R^2}\frac{1}{(1+h/R)^2} = \frac{g_0}{(1+h/R)^2}$$

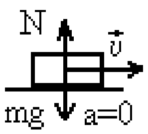
Где $g_0 = \dfrac{GM}{R^2}$ - ускорение свободного падения у поверхности Земли.

Вывод: в поле тяжести Земли все тела падают с одинаковым ускорением, которое зависит от радиуса Земли, ее массы и высоты тела над поверхностью Земли.

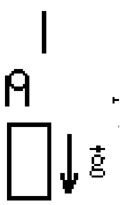
$$\vec{F}_Т = m\vec{g}$$

Вес тела это сила, с которой тело действует на опору или подвес. Если $\vec{N}$ - сила реакции опоры, приложенная к телу, то $\vec{p} = -\vec{N}$ - вес, приложенный к опоре со стороны тела. В общем случае вес не равен силе тяжести.

Примеры:

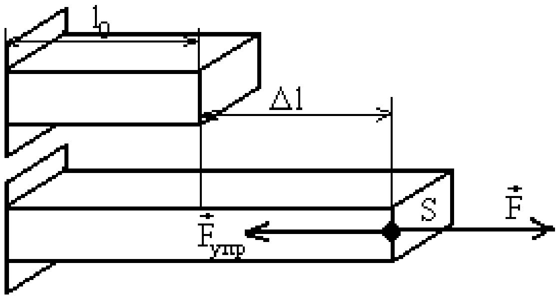


1. $\vec{p} = -\vec{N} = m\vec{g}$
2. $\vec{p} > \vec{F}_t$
3. $\vec{p} < \vec{F}_t$
4. $\vec{p} = 0$



Сила упругости. Закон Гука.

Деформация это изменение размеров или формы тела. При деформации возникает сила упругости, которая пытается вернуть телу прежние размеры и форму.



При упругих деформациях после снятия внешних сил, тело полностью восстанавливает размеры и форму. При неупругих деформациях после снятия внешних сил полного восстановления размеров и формы не происходит, остается так называемая остаточная деформация.

$\Delta l = l - l_0$ - абсолютная деформация.

$\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l}$ - относительная деформация.

S – площадь торца, к которому приложена сила.

$\sigma = \dfrac{F}{S}$ - напряжение. В системе СИ: $[\sigma] = \left[\dfrac{Н}{м^2}\right] = [Па]$.

<u>Закон Гука.</u>

При малых деформациях ($\varepsilon<<1$, $\Delta l<<l_0$) сила упругости прямо пропорциональна абсолютной деформации.

$\vec{F}_{упр} = -k\Delta l$

В системе СИ: $[k] = \left[\dfrac{Н}{м}\right]$ - коэффициент упругости, зависящий от материала тела и его геометрических размеров.

$\vec{F}_{упр} = -\vec{F}$

$\dfrac{F}{Sl} = \dfrac{k\Delta l}{Sl}$

$\dfrac{\sigma}{l} = \dfrac{k\varepsilon}{S}$

$\sigma = E\varepsilon$

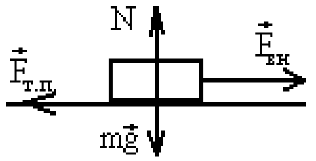
Где $E = \dfrac{kl}{S}$ - модуль Юнга.

В системе СИ: $[E] = \left[\dfrac{Н}{м^2}\right] = [Па]$. Модуль Юнга зависит только от материала тела.

Сила трения.

Сила трения возникает на поверхности соприкосновения тел.

Рассмотрим тело, которое покоится на горизонтальной поверхности. Пусть на тело действует внешняя сила. Если эта сила меньше некоторого определенного значения, то тело будет покоиться. Внешняя сила уравновешивается силой трения покоя.



1. $F_{вн} < \mu_{пок}N$

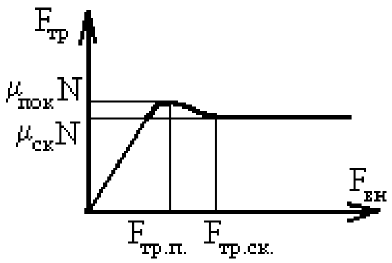
$F_{вн} = -F_{тр.п.}$

$\mu_{пок}$ - коэффициент трения покоя.

2. $F_{вн} < \mu_{пок}N$ - тело начинает скользить, возникает сила трения скольжения.

$F_{тр.с.} = \mu_{ск}N$, где $\mu_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

$\mu_{пок} > \mu_{ск}$.



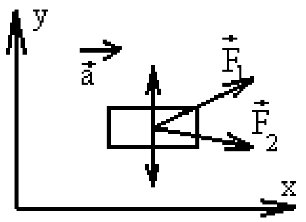
При решении задач будем полагать $\mu_{ск} \approx \mu_{пок} = \mu$.

Сила трения скольжения направлена против относительной скорости движения тела. При малых скоростях сила трения скольжения не зависит от скорости тела, а зависит от материала и состояния соприкасающихся поверхностей. Сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления тела на поверхность (по третьему закону Ньютона).

$F_{нд} = -N$

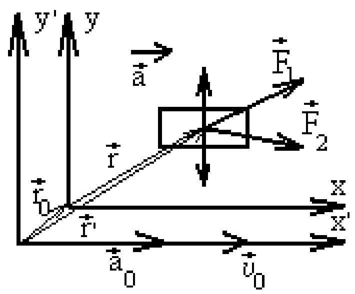
Силы инерции.

Рассмотрим движение тела в ИСО с ускорением. Запишем второй закон Ньютона для ИСО.



$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + ... + \vec{F}_n$$

Рассмотрим движение этого же тела в НИСО.



$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0$$

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}' + \vec{\upsilon}_0$$

$$\vec{a} = \vec{a}' + \vec{a}_0$$

$$m\vec{a}' + m\vec{a}_0 = \vec{F}_1 + ... + \vec{F}_n$$

$$m\vec{a}' = \vec{F}_1 + ... + \vec{F}_n - m\vec{a}_0$$

Здесь $\vec{F}_{инерц} = -m\vec{a}_0$ - сила инерции.

$m\vec{a}' = \vec{F}_1 + ... + \vec{F}_n + \vec{F}_{инерц}$ - закон Ньютона для НИСО.

Сила инерции является фиктивной силой, так как нельзя указать тело, со стороны которого она действует. Ускорение a_0 – это кажущееся ускорение, появляющееся за счет движения системы отсчета.

Вопросы для самопроверки

1.Определение основных понятий динамики: масса, импульс, сила. Единицы их измерения.

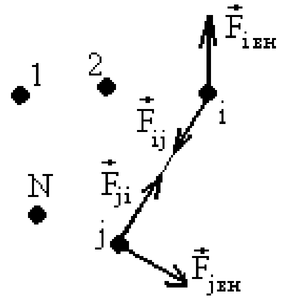
2. Формулировка 1, 2 и 3 законов Ньютона.

3.Границы применимости классической механики.

Лекция 3. Законы сохранения.

§1. Закон сохранения импульса.

Рассмотрим N взаимодействующих тел (материальных точек). На каждое тело действуют силы взаимодействия со стороны других (N-1) тел и некоторые внешние силы.



Запишем для каждого тела второй закон Ньютона.

$$m_1\vec{a}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + ... + \vec{F}_{1i} + ... + \vec{F}_{1j} + ... + \vec{F}_{1вн}$$

...

$$m_i\vec{a}_i = \sum_{n=1}^{N}\vec{F}_{in} + \vec{F}_{iвв}, \; i = 1,..., N$$

Сложим все N уравнений.

$$\sum_{i=1}^{N} m_i\vec{a}_i = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\vec{F}_{ij} + \sum_{i=1}^{N}\vec{F}_{iвв}, \; i \neq j$$

$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\vec{F}_{ij} = 0$ - по третьему закону Ньютона.

$$\sum_{i=1}^{N} m_i\vec{a}_i = \sum_{i=1}^{N}\vec{F}_{iвв}$$

$$m_i a_i = m_i\frac{d\vec{\upsilon}_i}{dt} = \frac{d(m_i\vec{\upsilon}_i)}{dt} = \frac{d\vec{p}_i}{dt}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\frac{d\vec{p}_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\vec{F}_{iвв}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\sum_{i=1}^{N}\vec{p}_i\right) = \sum_{i=1}^{N}\vec{F}_{iвв}$$

Здесь $\sum_{i=1}^{N}\vec{p}_i = \vec{p}$ - полный импульс системы.

Выводы: 1) Внутренние силы взаимодействия $\vec{F}_{ij}$ не могут изменить суммарный (полный) импульс системы. Только внешние силы могут изменить суммарный импульс системы; 2) В замкнутой системе полный импульс сохраняется.

Замкнутая система это система тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в систему (внешними).

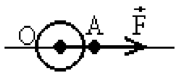
<u>Закон сохранения импульса.</u>

В замкнутой системе векторная сумма импульсов всех тел остается постоянной при любых движениях и взаимодействиях.

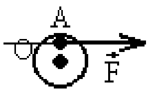
Центр масс.

Центр масс это точка, через которую должна проходить линия действия силы, чтобы под действием этой силы тело двигалось поступательно.

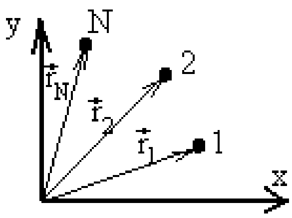
1. Поступательное



2. Поступательное + вращательное движение



Рассмотрим систему N материальных точек.



$$\vec{r}_{ц.м.} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i} \qquad x_{цм} = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} m_i}$$

Внутренние силы не могут изменить положение центра масс системы. Докажем это.

$$\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{a}_i = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{iвв}$$

$$\vec{a}_i = \frac{d\vec{\upsilon}_i}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2}$$

$$\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{a}_i = \sum_{i=1}^{N} m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i\right) = \frac{d^2}{dt^2}\left(\vec{r}_{ц.м.} \sum_{i=1}^{N} m_i\right) = M \frac{d^2 \vec{r}_{ц.м.}}{dt^2} = M\vec{a}_{ц.м.}$$

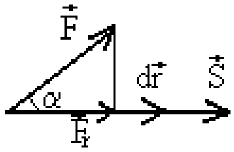
$$M\vec{a}_{ц.м.} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{iвв}$$

Пусть в начальный момент времени t=0, $\vec{\upsilon}_{ц.м.} = 0$. Пусть система замкнутая ($\sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{iвв} = 0$). Тогда $\vec{a}_{ц.м.} = 0$. Значит $\vec{r}_{ц.м.} = const$.

§2. Закон сохранения механической энергии.

Работа. Энергия.

Механическая работа.



1. Работа силы за бесконечно малый промежуток времени равна скалярному произведению вектора силы на вектор бесконечно малого перемещения.

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}) = FdrCos\alpha$$

2. Работа за конечный промежуток времени.

$$A = \int_0^t dA = \int_0^t \vec{F}d\vec{r} = \int_0^t FdrCos\alpha = \int_0^t F_r dr$$

3. Работа постоянной силы при прямолинейном движении. В системе СИ: $[A] = [Дж] = [Н \cdot м] = \left[\frac{кг \cdot м^2}{с^2}\right]$

$$A = FsCos\alpha$$

Кинетическая энергия это половина произведения массы тела на квадрат его скорости.

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}$$

Получим связь между кинетической энергией и работой. Рассмотрим второй закон Ньютона.

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \ldots + \vec{F}_n$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}$$

$$\frac{md\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{F}_1 + \ldots + \vec{F}_n \;\Big|\times d\vec{r}$$

$$\frac{md\vec{\upsilon}}{dt}d\vec{r} = \vec{F}_1 d\vec{r} + \ldots + \vec{F}_n d\vec{r}$$

$$d(\upsilon^2) = 2\upsilon d\upsilon = d\vec{\upsilon}\vec{\upsilon} + \vec{\upsilon}d\vec{\upsilon} = 2\vec{\upsilon}d\vec{\upsilon}$$

$$\frac{d(\upsilon^2)}{dt} = 2\vec{\upsilon}\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}$$

$$d\vec{r} = \vec{\upsilon}dt$$

$$\frac{d\vec{\upsilon}}{dt}\vec{\upsilon}dt = \vec{\upsilon}d\vec{\upsilon} = \frac{d(\upsilon^2)}{2} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}d\vec{r}$$

$$d\left(\frac{m\upsilon^2}{2}\right) = \vec{F}_1 d\vec{r} + \ldots + \vec{F}_n d\vec{r}$$

$$\int_0^E d\left(\frac{m\upsilon^2}{2}\right) = \int_0^t \vec{F}_1 d\vec{r} + \ldots + \int_0^t \vec{F}_n d\vec{r}$$

$$\frac{m\upsilon^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2} = A_1 + \ldots + A_n$$

$$\Delta E_k = A_1 + \ldots + A_n$$

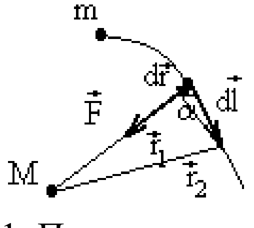
Потенциальные или консервативные силы это силы, работа которых при перемещении тела не зависит от траектории движения тела и определяется только начальным и конечным положениями тела (сила всемирного тяготения, сила Кулона).

Для потенциальных сил вводится понятие потенциальной энергии таким образом, чтобы работа потенциальной силы была равна изменению потенциальной энергии со знаком «минус».

$$dA = -dE_п$$

$$A = -\Delta E_п = E_{п1} - E_{п2}$$

Примеры:



1. Потенциальная энергия силы тяжести.

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

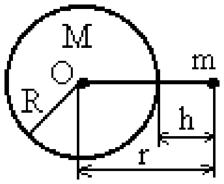
$$dA = \vec{F}d\vec{l} = \frac{GMm}{r^2}dlCos\alpha = \frac{GMm}{r^2}dr\text{ , } dr = dlCos\alpha$$

$$A = \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} GMm\frac{dr}{r^2} = GMm(-\frac{1}{r})\Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{GMm}{r_1} - \frac{GMm}{r_2} = E_{п1} - E_{п2}$$

$$E_п = -\frac{GMm}{r} + const$$

Потенциальная энергия определяется с точностью до произвольной константы, таким образом, физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а ее разность, так как $A = -\Delta E_п$.

Найдем потенциальную энергию силы тяжести вблизи поверхности



Земли.

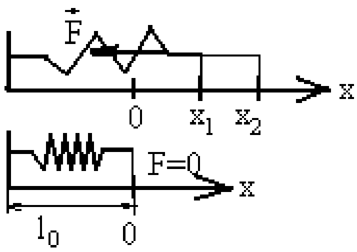
$$E_п = -\frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{R+h} = -\frac{GMm}{R}\frac{1}{1+h/R} \approx -\frac{GMm}{R}(1-\frac{h}{R}) = -\frac{GMm}{R} + \frac{GMmh}{R^2} =$$

$$= const + mgh$$

$$E_п \approx mgh$$

Если константу отбросить, то потенциальная энергия отсчитывается от поверхности Земли. Потенциальная энергия силы тяжести в общем случае равна нулю в бесконечно удаленной точке.

2. Потенциальная энергия силы упругости.



Если пружина не деформирована – 0.

$$dA = Fdx = -Kxdx$$

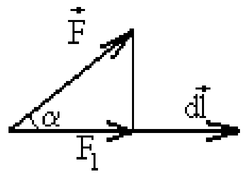
$$\int_{x_1}^{x_2} dA = -k\int_{x_1}^{x_2} xdx = -\frac{kx^2}{2}\Big|_{x_1}^{x_2} = -(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}) = -(E_{п2} - E_{п1})$$

$$E_п = \frac{kx^2}{2} \quad (x << l_0)$$

В системе СИ: $[E] = [Дж] = \left[\frac{кг \cdot м^2}{с^2}\right]$.

Получим связь между силой и потенциальной энергией.

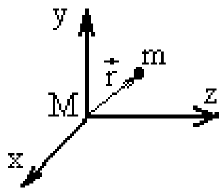
$$dA = \vec{F}d\vec{l} = FdlCos\alpha = F_l dl\,, F_l = lCos\alpha$$
$$dA = -dE_п$$
$$F_l dl = -dE_п$$
$$F_l = -\frac{dE_п}{dl} \quad F_x = -\frac{\partial E_п}{\partial x} \quad F_y = -\frac{\partial E_п}{\partial y} \quad F_z = -\frac{\partial E_п}{\partial z}$$



$$\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k} = -(\frac{\partial E_п}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial E_п}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial E_п}{\partial z}\vec{k}) = -gradE_п(x,y,z) = -\nabla E_п(x,y,z)$$

<u>Пример:</u>

$$E_п = -\frac{GMm}{r} = -\frac{\alpha}{r} = -\frac{\alpha}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}$$
$$F_x = -\frac{\partial E_п}{\partial x} = -(-\alpha(-\frac{1}{2})(x^2+y^2+z^2)^{-\frac{3}{2}}(2x)) = -\frac{\alpha}{r^2}\frac{x}{r} = -\frac{\alpha}{r^2}Cos\alpha$$



$$F_y = -\frac{\alpha}{r^2}Cos\beta \quad F_z = -\frac{\alpha}{r^2}Cos\gamma$$
$$F = \sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2} = \frac{\alpha}{r^2}\sqrt{Cos^2\alpha + Cos^2\beta + Cos^2\gamma} = \frac{GMm}{r^2}$$

Закон сохранения и изменения полной механической энергии.

Рассмотрим тело, на которое действуют потенциальные силы, силы трения и другие внешние силы.

$$m\vec{a} = \vec{F}_п + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{вн}$$
$$E_{к2} - E_{к1} = A_п + A_{тр} + A_{вн}$$
$$A_п = -(E_{п2} - E_{п1})$$
$$E_{к2} - E_{к1} - E_{п1} + E_{п2} = A_{тр} + A_{вн}$$
$$(E_{k2} + E_{п2}) - (E_{k1} + E_{п1}) = A_{тр} + A_{вн}$$

$E = E_к + E_п$ - полная механическая энергия тела.

$E_2 - E_1 = A_{тр} + A_{вн}$ – (*) - закон изменения энергии для одного тела.

Если система состоит из N тел, и (*) записать для каждого тела системы, а потом сложить их, то получится закон изменения и сохранения механической энергии для системы тел.

$$\sum_{i=1}^{N}(E_{i2} - E_{i1}) = \sum_{i=1}^{N}(A_{iтт} + A_{iвв})$$

<u>Закон сохранения механической энергии.</u>

Если в замкнутой системе взаимодействие между телами осуществляется только потенциальными силами, и нет сил трения, то полная механическая энергия системы остается постоянной.

$$\sum_{i=1}^{N}E_{i2} = \sum_{i=1}^{N}E_{i1} = const$$

Если в замкнутой системе действуют силы трения, то механическая энергия не сохраняется, а переходит во внутреннюю энергию (тепло).

$$Q = E_1 - E_2 = -A_{тр}$$

Суммарная работа всех сил трения в замкнутой системе всегда отрицательна, хотя отдельные силы трения могут совершать положительную работу.

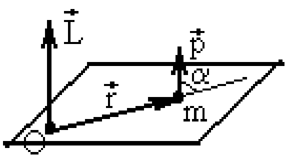
Вопросы для самопроверки

1. Определения работы, кинетической и потенциальной энергий. Какова связь между ними.

2. Формулировка законов сохранения: импульса, механической энергии

Лекция 4. Динамика вращательного движения.

Момент импульса материальной точки это вектор, равный векторному произведению радиус-вектора на вектор импульса.



$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$$

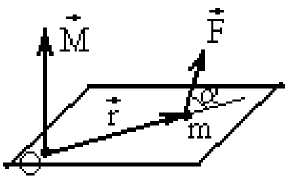
$$L = rp\,\mathrm{Sin}\alpha$$

$$L = rm\upsilon\,\mathrm{Sin}\alpha$$

$$\vec{L} \perp \vec{r} \quad \vec{L} \perp \vec{p}$$

Если материальная точка движется в плоскости, то $\vec{L}$ перпендикулярен этой плоскости и задает ось вращения.

Момент силы это вектор, равный векторному произведению радиус-вектора на вектор силы.



$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$$

$$M = rF\,\mathrm{Sin}\alpha$$

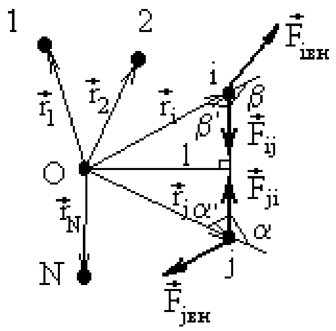
$$\vec{M} \perp \vec{r} \quad \vec{M} \perp \vec{F}$$

Рассмотрим систему N материальных точек. Запишем второй закон Ньютона для каждого тела.

$$m_i \vec{a}_i = \sum_{j=1}^{N} \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{iвв} \quad , i \neq j \; (i = 1, ..., N)$$

Каждое уравнение векторно умножим на соответствующий радиус-вектор.

$$m_i [\vec{r}_i \times \vec{a}_i] = \sum_{j=1}^{N} [\vec{r}_i \times \vec{F}_{ij}] + [\vec{r}_i \times \vec{F}_{iвв}]$$



Просуммируем эти N уравнений.

$$\sum_{i=1}^{N} m_i[\vec{r}_i \times \vec{a}_i] = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}[\vec{r}_i \times \vec{F}ij] + \sum_{i=1}^{N}[\vec{r}_i \times \vec{F}_{iвв}]$$

$$\left|[\vec{r}_1 \times \vec{F}_{12}] + [\vec{r}_2 \times \vec{F}_{21}]\right| = |r_1F_{12}\mathrm{Sin}\,\alpha - r_2F_{21}\mathrm{Sin}\,\beta| = |\mathrm{Sin}\,\alpha' F_{12}r_1 - r_2F_{21}\mathrm{Sin}\,\beta'| =$$

$$= |F_{12}l - F_{21}l| = 0 \quad ,(|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}|)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}[\vec{r}_i \times \vec{F}_{ij}] = 0$$

Сумма моментов внутренних сил всегда равна нулю.

$$m_i[\vec{r}_i \times \vec{a}_i] = m_i\left[r_i \times \frac{d\vec{\upsilon}_i}{dt}\right] = \left[\vec{r}_i \times \frac{d\vec{p}_i}{dt}\right] = \frac{d}{dt}[\vec{r}_i \times \vec{p}_i] = \frac{d\vec{L}_i}{dt}$$

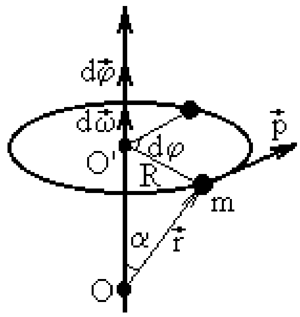
$$\sum_{i=1}^{N}\frac{d\vec{L}_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N}[\vec{r}_i \times \vec{F}_{iвв}]$$

$\dfrac{d}{dt}\sum_{i=1}^{N}\vec{L}_i = \sum_{i=1}^{N}\vec{M}_{iвв}$ - закон изменения момента импульса.

Суммарный момент импульса системы может меняться только под действием внешних сил. Моменты внутренних сил суммарный момент импульса изменить не могут. В замкнутой системе суммарный момент импульса остается постоянным.

$\sum_{i=1}^{N}\vec{L}_i = \mathrm{const}$ - закон сохранения момента импульса.

Рассмотрим движение материальной точки по окружности.



$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{i=1}^{N}\vec{M}_{iвв}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}[\vec{r} \times \vec{p}]$$

$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}] = [\vec{r} \times (m\vec{\upsilon})] = m[\vec{r} \times \vec{\upsilon}]$$

$$\vec{\upsilon} = [\vec{\omega} \times \vec{r}]$$

$$\vec{L} = m[\vec{r} \times [\vec{\omega} \times \vec{r}]] = m(\vec{\omega}(\vec{r},\vec{r}) - \vec{r}(\vec{r},\vec{\omega})) = mr^2\vec{\omega} - mr\omega\mathrm{Cos}\alpha\,\vec{r}$$

Точку O перенесем в O’, то есть начало координат перенесем в центр окружности.

$$\vec{L} = mr^2\vec{\omega} = mR^2\vec{\omega}$$

$J = mR^2$ - момент инерции материальной точки относительно неподвижной оси вращения.

$$\vec{L} = J\vec{\omega}$$

Для тела произвольной формы $J = \sum_{i=1}^{N} m_i r_i^2$.

$$J = \int_V r^2 dm = \int_V r^2\rho dV = \iiint_V (x^2 + y^2 + z^2)\rho(x,y,z)dxdydz$$

Моменты инерции:

1. Материальной точки J=mR^2.

2. Обруч $J=mR^2$.

3. Однородный цилиндр $J=\frac{1}{2}mR^2$.

4. Шар $J=\frac{2}{5}mR^2$

$$\frac{d\vec{L}}{dt}=\frac{dJ\vec{\omega}}{dt}=J\vec{\varepsilon}=\sum_{i=1}^{N}\vec{M}_{iвв}$$

$J\vec{\varepsilon}=\sum_{i=1}^{N}\vec{M}_{iвв}$ - основное уравнение динамики вращательного движения.

Вопросы для самопроверки

1. Определение основных понятий динамики вращательного движения: момент инерции, момент импульса, момент силы. Единицы их измерения.

2. Формулировка основного закона динамики вращательного движения.

3. Формулировка закона сохранения момента импульса

Лекция 5. Электростатика

§1: Напряженность электростатического поля. Теорема Гаусса.

Два вида электрических зарядов. Закон сохранения электрического заряда.

При трении тела приобретают способность взаимодействовать. Это явление объясняется тем, что тела приобретают электрический заряд. Одноименно заряженные тела отталкиваются, разноименно заряженные тела притягиваются. С современной точки зрения вещество состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, которые движутся вокруг ядра. Суммарный заряд электронов по модулю равен заряду ядра, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Работа выхода электронов это энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы он покинул вещество и стал свободным.

При трении двух тел электроны переходят из тела, где работа выхода меньше, в тело, где работа выхода больше. Тела, откуда электроны ушли, заряжаются положительно, а тела, куда электроны пришли, заряжаются отрицательно. Сразу же из объяснения электризации следует

Закон сохранения электрического заряда – один из фундаментальных законов природы.

В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной. Заряды либо переходят с одного тела на другое, либо рождаются и уничтожаются парами, причем заряд каждой пары равен по модулю и противоположен по знаку.В системе СИ: $[q]=[Кл]$.

$$q_1+q_2+...+q_n=const$$

Пример: β - распад $(n=p+e+\nu)$.

Один Кулон это заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока один Ампер.

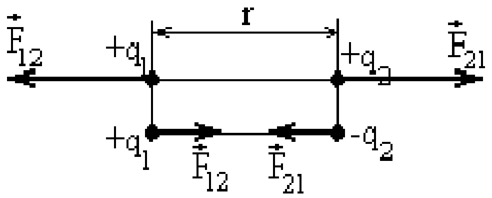
Заряды электрона и протона (элементарный заряд) это наименьший отрицательный и положительный заряды, встречающиеся в природе.

$$e=-1{,}6\cdot10^{-19}\ Кл \quad p=+1{,}6\cdot10^{-19}\ Кл$$

Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции.

Закон Кулона

Два точечных заряда в вакууме взаимодействуют с силой, прямо пропорциональной произведению модулей зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними (одноименные – отталкиваются, разноименные – притягиваются).

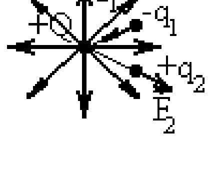


$F_{12}=F_{21}=k\dfrac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2}$ - закон Кулона в вакууме.

Здесь $k=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\cdot10^9\ \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$, где $\varepsilon_0=8{,}85\cdot10^{-12}\ \dfrac{Ф}{м}$ - электрическая постоянная.

Напряженность электрического поля это вектор, равный силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля (напряженность это силовая характеристика электростатического поля; вектор напряженности приписывается к каждой точке пространства, где существует поле). В системе СИ: $[E]=\left[\dfrac{Н}{Кл}\right]=\left[\dfrac{В}{м}\right]$.

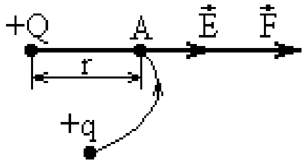
$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}$$



Электрическое поле это форма материи. Электростатическое поле образуется вокруг зарядов. Главное свойство электростатического поля – действовать на заряды, помещенные в поле с силой, пропорциональной величине заряда.

Электростатическое поле является посредником при взаимодействии двух зарядов

Найдем напряженность электростатического поля, созданного точечным зарядом.

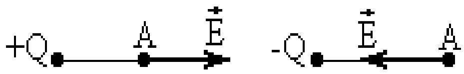


+Q – заряд, создающий электрическое поле. Найдем напряженность в точке A, отстоящей от Q на расстояние r. Для этого в точку A поместим пробный заряд q. Найдем силу, действующую на заряд со стороны поля.

$$F = k\frac{|Q||q|}{r^2}$$

$E = \dfrac{F}{|q|} = k\dfrac{|Q|}{r^2}$ - напряженность поля точечного заряда.

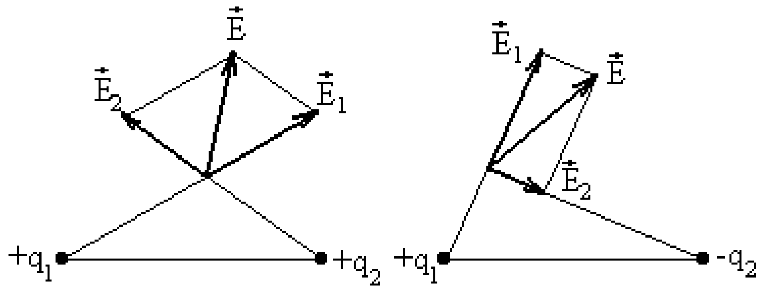
Вектор напряженности по направлению совпадает с силой, действу-



ющей на положительный пробный заряд в данной точке.

Принцип суперпозиции

Напряженность электрического поля, созданного системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым зарядом в отдельности.

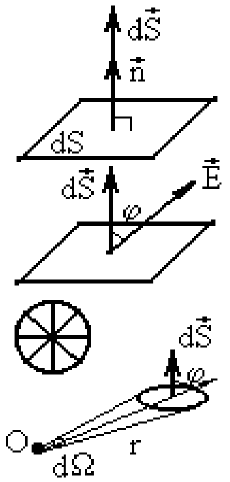


$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$$

Теорема Гаусса.

Поток вектора напряженности электростатического поля

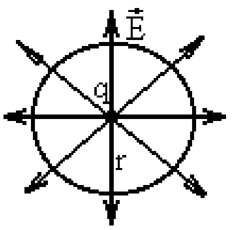
Поток вектора напряженности электрического поля через площадку $d\vec{S}$ равен скалярному произведению векторов $\vec{E}$ и $d\vec{S}$. В системе СИ: $[\Phi] = [\text{В} \cdot \text{м}]$.



$$d\vec{S} = dS\vec{n}$$
$$d\Phi = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = EdSCos\varphi$$
$$\Phi = \int (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int EdSCos\varphi$$

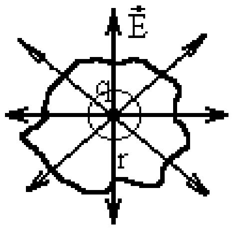
Поток можно считать равным числу силовых линий, проходящих через поверхность.

Телесный угол $d\Omega$, опирающийся на площадку dS равен $d\Omega = \frac{dSCos\varphi}{r^2}$. $[d\Omega] = [\text{ст.рад.}]$.



Возьмем точечный заряд, окружим его сферой радиуса r и найдем поток вектора напряженности через эту сферу ($\vec{E}$ перпендикулярен сфере).

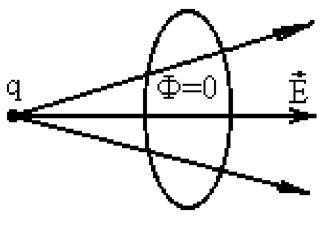
$$\Phi = \oint_S \vec{E}d\vec{S} = \oint_S EdS = E\oint_S dS = ES = \frac{4q\pi r^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$



Допустим, возьмем поверхность произвольной формы. Вспомним геометрическую интерпретацию потока вектора напряженности (поток равен числу силовых линий через поверхность). Из рисунка видно, что число силовых линий, проходящих через замкнутую поверхность, не зависит от формы поверхности. Следовательно, и поток вектора напряженности не зависит от формы поверхности, охватывающей заряд.

<u>Теорема Гаусса.</u>

Поток вектора напряженности электростатического поля через произвольную замкнутую поверхность в вакууме равен алгебраической сумме электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью, делить на электрическую постоянную.

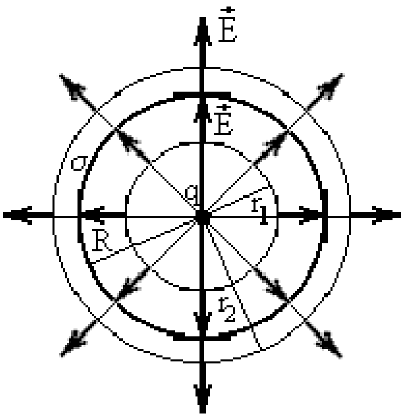


Для дискретных зарядов: $\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_i q_i$.

Для непрерывных зарядов: $\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho dV$.

Применение теоремы Гаусса.

Теорема Гаусса позволяет легко получать напряженность электростатического поля, если распределение заряда имеет какую-либо симметрию. Обычно это осевая или центральная симметрия.



1. Равномерно заряженная сфера.

$\sigma = \frac{q}{S}$. $[\sigma] = \left[\frac{Кл}{м^2}\right]$ - поверхностная плотность заряда.

Поместим внутрь сферы сферу радиусом r_1 ($r_1<R$). Поскольку распределение заряда обладает центральной симметрией, тои вектора напряженности будут обладать центральной симметрией и будут направлены вдоль радиусов сферы. На равном расстоянии от центра сферы модули векторов напряженности будут одинаковы. Найдем поток через мыслимую сферу радиуса r_1.

$$\Phi_1 = \oint_{S_1} \vec{E}d\vec{S} = \oint_{S_1} EdS = ES = 0$$

$$S \neq 0 \Rightarrow E = 0\,(r_1 < R)$$

Вывод: внутри равномерно заряженной сферы электростатического поля нет.

Вокруг заряженной сферы проведем мысленную сферу радиуса $r_2>R$. Так как заряд обладает центральной симметрией, то вектора напряженности направлены по радиусам сферы и равны по модулю на равном расстоянии от центра сферы. Найдем поток через мыслимую сферу.

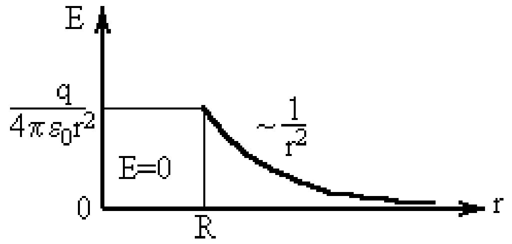
$\Phi_2 = ES = \frac{1}{\varepsilon_0} q$, где $q = \sigma S$ - полный заряд сферы.

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 S} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}$$

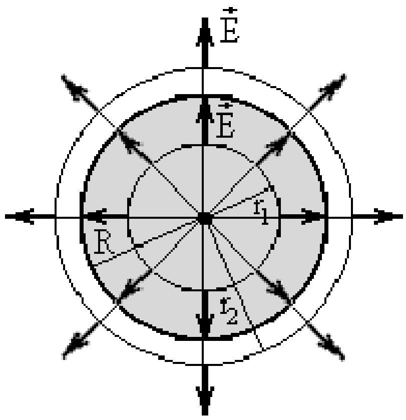
Если $r_2<R$, то $E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$.

Вывод: вне равномерно заряженной сферы электростатическое поле такое же, как у точечного заряда, помещенного в центр сферы.

График изменения напряженности в зависимости от радиуса (напряженность положительного заряда).



2. Равномерно заряженный шар с плотностью заряда $\rho = \dfrac{q}{V}$.



Распределение заряда имеет центральную симметрию, поэтому вектор напряженности направлен по радиусам, модуль вектора напряженности одинаков на равном расстоянии от центра шара.

Поместим мысленную сферу радиусом r<R внутрь шара. Найдем поток.

$$\Phi = ES = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho\frac{4}{3}\pi r^3$$

$$E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}\frac{4}{3}\pi r^3\frac{1}{4\pi r^2} = \frac{\rho}{3\varepsilon_0}r$$

Если r<R, то $E = \dfrac{\rho}{3\varepsilon_0}r$.

Проведем мысленную сферу r>R вокруг шара. Найдем поток.

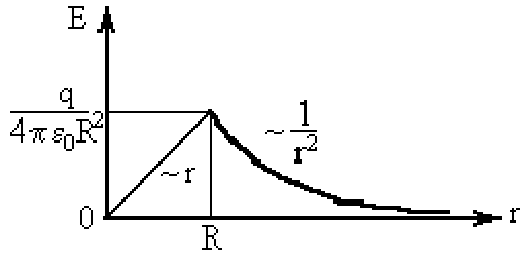
$$\Phi = ES = \rho V\frac{1}{\varepsilon_0}$$

$$S = 4\pi r^2 \quad V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

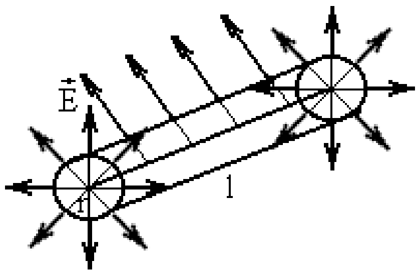
$$4\pi r^2 E = \frac{\rho}{\varepsilon_o}\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$r > R, \quad E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

Вне равномерно заряженного шара напряженность такая, как у точечного заряда, помещенного в центр шара.



3. Равномерно заряженная бесконечная нить с линейной плотностью заряда $\tau = \frac{q}{l}$.



Мысленно окружим нить цилиндром радиуса r. Распределение заряда обладает осевой симметрией, поэтому электростатическое поле также будет обладать осевой симметрией. Это значит, что вектора напряженности направлены по радиусам цилиндра (перпендикулярно поверхности цилиндра), на поверхности цилиндра модули векторов напряженности одинаковы. Найдем поток через поверхность цилиндра.

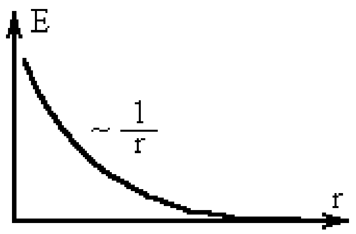
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = E_1S_1 + E_2S_2 + E_3S_3$$

$$E_2S_2 = E_3S_3 = 0 \Rightarrow \Phi = E_1S_1$$

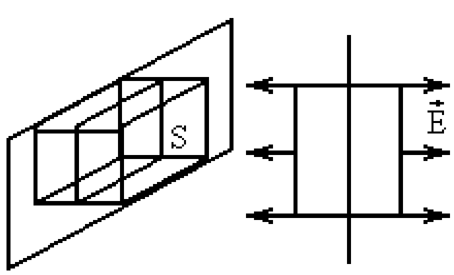
$$S_1 = 2\pi rl$$

$$\Phi = \frac{\tau l}{\varepsilon_0} = ES_1$$

$$E = \frac{\tau l}{2\pi\varepsilon_0 rl} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}$$



4. Бесконечная равномерно заряженная плоскость с $\sigma = \frac{q}{S}$.



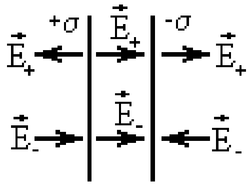
Возьмем на плоскости коробку со сторонами параллельными плоскости. Из соображений симметрии электрическое поле будет однородным, то есть одинаковым во всех точках пространства, и вектор напряженности будет перпендикулярен плоскости.

Найдем поток через мыслимую поверхность.

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi^{(\text{бок})} = 2ES = \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma S}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

5. Поле плоского конденсатора.

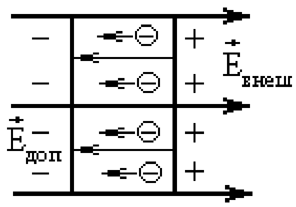


Рассмотрим две бесконечные параллельные плоскости, имеющие равные по модулю и противоположные по знаку заряды. Из соображений симметрии поле однородно и перпендикулярно поверхности. Вне плоскости поля нет.

Внутри $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$.

§2: Электростатическое поле в проводниках и диэлектриках.

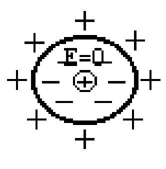
Проводник это материал, имеющий внутри себя свободные заряды. В металлах – валентные электроны, в электролитах – ионы, в газах – ионы и электроны.



Если проводник (металл) поместить в электростатическое поле, то под действием поля отрицательные электроны проводимости будут двигаться против направления поля. В результате перемещения электронов на поверхности металла возникнут не скомпенсированные заряды. Там, откуда электроны ушли, заряд будет отрицательный, куда пришли – положительный. Поверхностные заряды создают дополнительное электростатическое поле, которое внутри металла направлено против внешнего поля. Свободные электроны будут двигаться до тех пор, пока дополнительное поле не скомпенсирует внешнее поле.

Вывод:

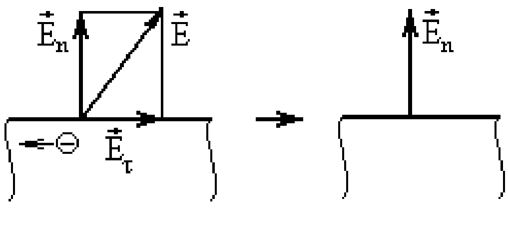
1) Внутри проводников результирующая напряженность электростатического поля всегда равна нулю.



2) Внутри проводника не может существовать не скомпенсированных зарядов. Заряды могут существовать только на поверхности проводника.

3) Вне проводника напряженность результирующего поля перпендикулярна поверхности проводника. Поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью, то есть потенциалы всех точек поверхности одинаковы.

Доказательство:



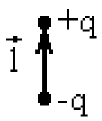
Предположим, что электрическое поле не перпендикулярно поверхности.

Тогда будет существовать тангенциальная составляющая вектора напряженности, параллельная поверхности. Под действием тангенциальной составляющей электроны начнут двигаться по поверхности, произойдет перераспределение поверхностного заряда таким образом, чтобы дополнительное поле скомпенсировало тангенциальную составляющую внешнего поля. В результате останется только составляющая, перпендикулярная поверхности.

Предположим, что две точки металла имеют разные потенциалы, следовательно, возникнет движение свободных электронов, произойдет перераспределение поверхностных зарядов так, чтобы потенциалы выбранных точек стали равны.

Наведение электростатического поля внутри проводника называется электростатической индукцией.

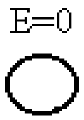
Диэлектрики это вещества (материалы), которые внутри себя практически не имеют свободных зарядов. Диэлектрики бывают полярные и неполярные.

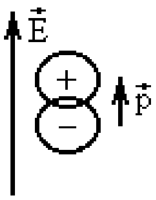


Два заряда +q и –q имеют дипольный момент, равный $\vec{p} = +q\vec{l}$, где l – плечо диполя.

В отсутствие внешнего электростатического поля молекулы **неполярного диэлектрика** имеют нулевой дипольный момент, то есть центры положительного и отрицательного зарядов совпадают. Внешнее поле поляризует молекулу, то есть центры положительных зарядов смещаются по полю, отрицательных – против поля. Молекула приобретает дипольный момент.

1)



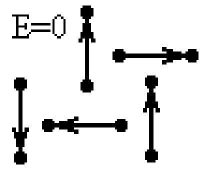


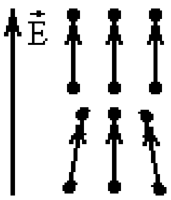
2)

Неполярными диэлектриками являются все инертные газы (вещества с симметричными молекулами).

При отсутствии внешнего электростатического поля молекулы полярного диэлектрика имеют дипольный момент, но тепловое движение располагает эти дипольные моменты хаотично.

1)



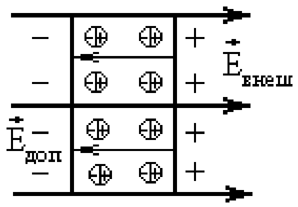


2) Положительные – по полю, отрицательные – против.

Внешнее электрическое поле упорядочивает дипольные моменты, тем самым, поляризуя диэлектрик.

Поляризация это вектор, равный суммарному дипольному моменту всех молекул единицы объема.

$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \vec{p}_i}{V}$, где N – число молекул в объеме.



Поместим диэлектрик в электростатическое поле. Диэлектрик поляризуется. В результате образуется поверхностный заряд. Возникает дополнительное поле, которое внутри диэлектрика направлено против внешнего поля. Так как заряды в диэлектрике связаны, то поверхностные заряды небольшие, дополнительное поле только частично компенсирует внешнее.

$\vec{E}_{рез} = \vec{E}_{внеш} + \vec{E}_{доп} \neq 0$

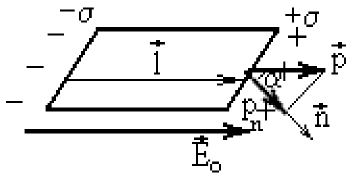
$\vec{E}_{рез} < \vec{E}_{внеш} \Rightarrow$

Диэлектрик ослабляет электростатическое поле.

<u>Диэлектрическая проницаемость</u> показывает во сколько раз электростатическое поле в диэлектрике меньше, чем в вакууме (при условии, что диэлектрик бесконечный и однородный).

$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$

Теорема Гаусса для диэлектриков.



Рассмотрим диэлектрик в виде призмы. Под действием внешнего поля диэлектрик поляризуется, на его боковой поверхности образуются поверхностные заряды. $\vec{n}$ - вектор единичной нормали к боковой поверхности, S – площадь боковой поверхности.

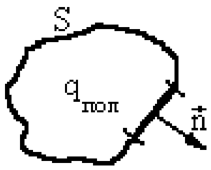
$$\vec{P} = \frac{\sigma S}{V}\vec{l}$$

$$V = S(\vec{l} \cdot \vec{n}) = Sl\cos\alpha$$

$$(\vec{P} \cdot \vec{n}) = \frac{\sigma S}{V}(\vec{l} \cdot \vec{n})$$

$P_n = \sigma$ - связь поверхностного заряда с поляризацией.

Если диэлектрик поляризован неоднородно (т.е. $\vec{p}$ различен в разных частях диэлектрика), то наряду с поверхностными зарядами возникают объемные заряды (т.е. заряды, распределенные внутри диэлектрика).



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

$$q_{пол} = -\oint_S \sigma dS = -\int_S P_n dS = -\oint_S \vec{P}dS$$

Запишем теорему Гаусса для выделенного объема.

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}(\sum q_{своб} + \sum q_{связ})$$

$q_{связ}$ – те заряды, которые появляются в результате поляризации диэлектрика. Т.е. $\sum q_{связ} = q_{пол}$.

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}(\sum q_{своб} - \oint_S \vec{P}d\vec{S})$$

$$\oint_S \varepsilon_0 \vec{E}d\vec{S} + \oint_S \vec{P}d\vec{S} = \sum q_{своб}$$

$$\oint_S (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P})d\vec{S} = \sum q_{своб}$$

$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ - вектор электрического смещения (или вектор электростатической индукции).

Теорема Гаусса для диэлектриков.

Поток вектора смещения через произвольную замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов внутри этой поверхности.

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = \sum q_{своб}$$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E}\,æ$$

Здесь æ – поляризуемость. $\vec{E}$ - результирующий вектор напряженности внутри диэлектрика.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_o \vec{E}\,æ = \varepsilon_0 \vec{E}(1 + æ)$$

ε=1+æ

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$$

ε для неоднородных и анизотропных диэлектриков является матрицей.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$D_x = \varepsilon_0(\varepsilon_{xx}E_x + \varepsilon_{xy}E_y + \varepsilon_{xz}E_z)$$

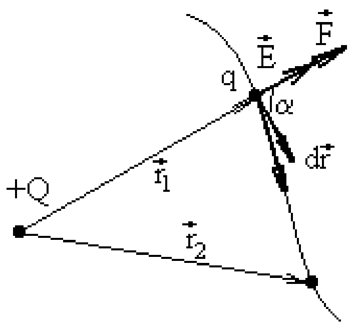
$$D_y = \varepsilon_o(\varepsilon_{yx}E_x + \varepsilon_{yy}E_y + \varepsilon_{yz}E_z)$$

$$D_z = \varepsilon_o(\varepsilon_{zx}E_x + \varepsilon_{zy}E_y + \varepsilon_{zz}E_z)$$

В общем случае вектора $\vec{D}$ и $\vec{E}$ не совпадают по направлению.

§3: Потенциал электростатического поля. Принцип суперпозиции.

Рассмотрим поле точечного заряда и найдем работу, совершенную полем при перемещении пробного заряда.



$$A = \int_1^2 (\vec{F}\cdot d\vec{r}) = \int_1^2 (q\vec{E}\cdot d\vec{r})$$

$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2}\frac{\vec{r}}{r}$$

Здесь $\frac{\vec{r}}{r}$ - единичный вектор, задающий направление $\vec{r}, \vec{E}, \vec{F}$. $\frac{\vec{r}}{r} = \vec{n}_r$.

$$A = q\int_1^2 \frac{kQ}{r^3}(\vec{r}\cdot d\vec{r})$$

$$(\vec{r}\cdot\vec{r}) = r^2$$

$$(\vec{r}\cdot d\vec{r}) = rdr$$

$$A = q\int_{r_1}^{r_2} \frac{kQ}{r^2}dr = kQq\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = kQq(-\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_1})$$

Мы получили, что работа силы Кулона не зависит от траектории движения пробного заряда q и определяется только его начальным и конечным положениями. Таким образом, мы доказали, что сила Кулона – потенциальная сила.

$$A = -\frac{kQq}{r_2} + \frac{kQq}{r_1}$$

Следовательно, для силы Кулона можно ввести потенциальную энергию таким образом, чтобы работа силы Кулона была равна изменению потенциальной энергии со знаком «минус».

$$A = -(W_{п2} - W_{п1})$$

$W_п = k\dfrac{Qq}{r}$ - потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов q и Q.

Потенциальная энергия определяется с точностью до постоянного слагаемого.

$$W'_п = k\frac{dQ}{r} + const$$

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -(W'_{п2} - W'_{п1})$$

Поэтому физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а ее только разность. Выбором произвольного слагаемого в формуле потенциальной энергии можно перенести начало отсчета потенциальной энергии в произвольную точку. Обычно за начало отсчета берут бесконечно удаленную точку.

Потенциал электростатического поля в данной точке это физическая величина, равная потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда, помещенного в данную точку поля. В системе СИ: $[\varphi] = \left[\frac{Дж}{Кл}\right] = [В]$.

$$\varphi = \frac{W_п}{q}$$

Примеры:

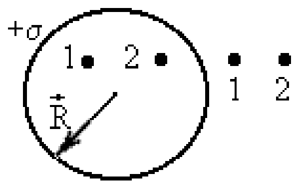
1. Потенциал поля точечного заряда.

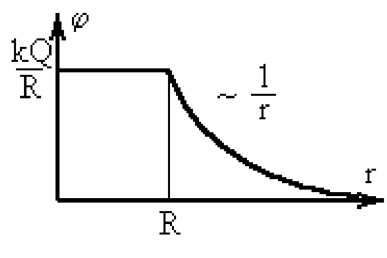
$$\varphi = \frac{kQ}{r}$$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{A}{q}$$

2. Потенциал поля равномерно заряженной сферы.





$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$$r < R \Rightarrow E = 0$$

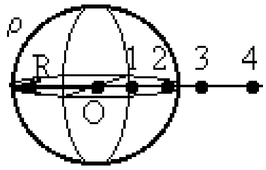
$$r > R \Rightarrow E = \frac{kq}{r^2}$$

$$Q = 4\pi R^2 \sigma$$

Внутри сферы потенциал всех точек одинаков $(\varphi_2 - \varphi_1 = 0)$. $\varphi = \frac{kQ}{R} = const$.

Вне сферы $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{kQ}{r_2} - \frac{kQ}{r_1}$. $\varphi = \frac{kQ}{r}$.

3. Поле равномерно заряженного шара.



$$Q = \rho V = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$

$$r < R \Rightarrow E = \frac{\rho}{3\varepsilon_0} r$$

$$r > R \Rightarrow E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

а) r<R

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{A}{q} = -\frac{1}{q}\int_{r_1}^{r_2} Fdr = -\frac{1}{q}\int_{r_1}^{r_2} qEdr = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{3\varepsilon_0} rdr = -\frac{\rho}{6\varepsilon_0} r^2 \Big|_{r_1}^{r_2}$$

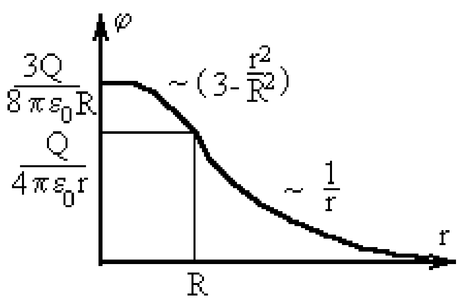
$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\left(\frac{\rho}{6\varepsilon_0} r_2^2 - \frac{\rho}{6\varepsilon_0} r_1^2\right)$$

$$\varphi_{внут} = -\frac{\rho}{6\varepsilon_0} r^2 + const$$

б) r>R

$$\varphi_4 - \varphi_3 = \frac{kQ}{r_4} - \frac{kQ}{r_3}$$

$$\varphi_{внеш} = \frac{kQ}{r}$$



$$r = R \quad \varphi_{внеш} = \varphi_{внут}$$

$$-\frac{\rho}{6\varepsilon_0}R^2 + const = \frac{kQ}{R} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$$

$$const = \frac{\rho}{6\varepsilon_0}r^2 + \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$$

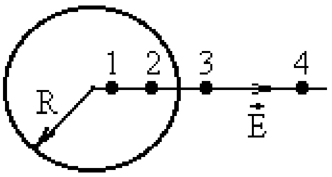
$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{3Q}{4\pi R^3}$$

$$const = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R} + \frac{3Q}{24\pi\varepsilon_0 R} = \frac{3Q}{2R\cdot 4\pi\varepsilon_0}$$

$$\varphi_{внут} = -\frac{\rho}{6\varepsilon_0}R^2 + \frac{3Q}{2R\cdot 4\pi\varepsilon_0} = \frac{Q}{8\pi\varepsilon_0 R}(3 - \frac{r^2}{R^2})$$

4. Равномерно заряженный бесконечный цилиндр.

$$\tau = \frac{Q}{l}$$

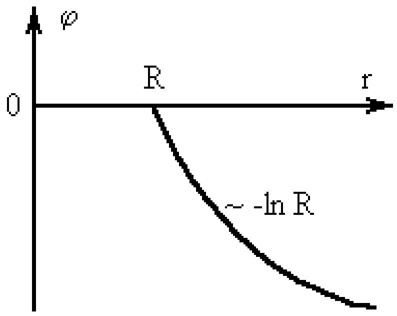


а) r<R

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi_{внут} = const$$

$$\varphi_{внут}(R) = \varphi_{внеш}(R) \Rightarrow const = 0$$

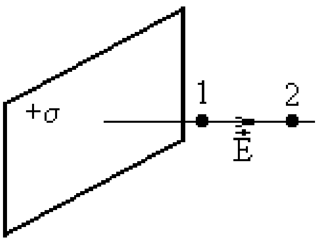
б) $r \geq R$



$$\varphi_4 - \varphi_3 = -\int_3^4 \vec{E}d\vec{r} = -\int_3^4 Edr = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_3}^{r_4}\frac{dr}{r} = -(\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_4}{R} - \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_3}{R})$$

$$\varphi_{внеш} = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r}{R}$$

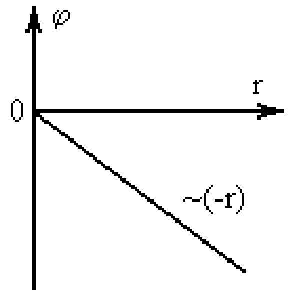
5. Потенциал равномерно заряженной бесконечной плоскости.



$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int_1^2 \vec{E}d\vec{r} = -\int_1^2 Edr = -\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2} dr = -(\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}r_2 - \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}r_1)$$

$$\varphi = -\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}r$$



Принцип суперпозиции для потенциалов

Потенциал поля, созданного системой заряженных тел, равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных каждым заряженным телом в отдельности.

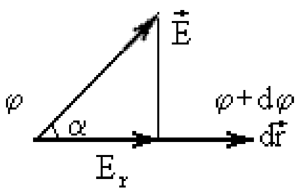
$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + ... + \varphi_n$$

§4: Связь между напряженностью и разностью потенциалов электростатического поля. Граничные условия.

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{A}{q} = -\frac{1}{q}\int_1^2 \vec{F}d\vec{r} = -\frac{1}{q}\int_1^2 q\vec{E}d\vec{r}$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int_1^2 \vec{E}d\vec{r}$$

Рассмотрим бесконечно малое перемещение dr. $\vec{E}$ практически постоянный.



$$d\varphi = -\vec{E}d\vec{r} = -EdrCos\alpha = E_r dr$$

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr}$$

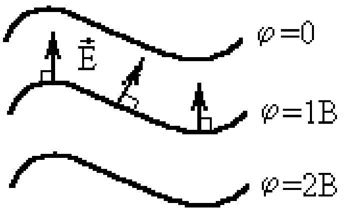
Проекция вектора напряженности на вектор перемещения равна отношению изменения потенциала вдоль перемещения к величине перемещения.

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

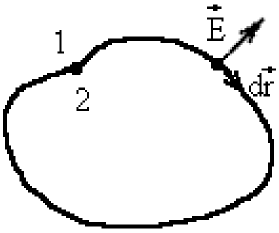
$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) = -\mathrm{grad}\,\varphi$$

Физический смысл градиента: градиент скалярной функции в данной точке дает направление наибольшего изменения функции в данной точке.

Вектор напряженности всегда перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям.



Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля.



Найдем работу электростатического поля на замкнутой траектории.

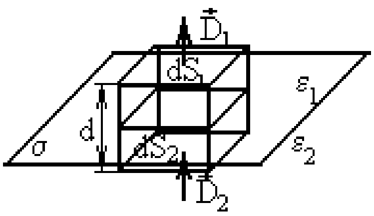
$$A_0 = \oint q\vec{E}d\vec{r} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$$

Теорема.

Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль произвольного замкнутого контура всегда равна нулю.

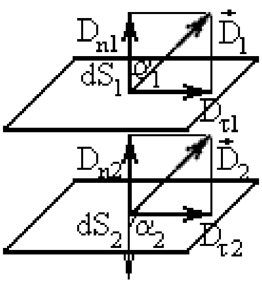
$$\oint \vec{E}d\vec{r} = 0$$

Граничные условия.



Рассмотрим поверхность соприкосновения двух диэлектриков. Пусть на поверхности имеется поверхностный заряд σ. На границе поверхности рассмотрим параллелепипед. Применим теорему Гаусса к выбранному параллелепипеду.

$$\oint \vec{D}d\vec{S} = \sum q_{своб}$$



d<<1, значит потоком через боковую поверхность можно пренебречь.

S<<1, значит потоки через верхнюю и нижнюю поверхность будут иметь вид:

$$\oint \vec{D}d\vec{S} = \vec{D}_1 d\vec{S}_1 + \vec{D}_2 d\vec{S}_2 = D_{n1}dS_1 - D_{n2}dS_2 = (D_{n1} - D_{n2})dS = \sigma dS$$

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma$$

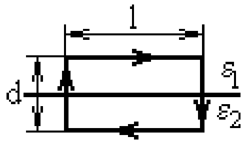
$$\varepsilon_1 E_{n1} - \varepsilon_2 E_{n2} = \sigma$$

<u>Граничные условия для нормальных составляющих $\vec{D}$ и $\vec{E}$</u> при σ=0.

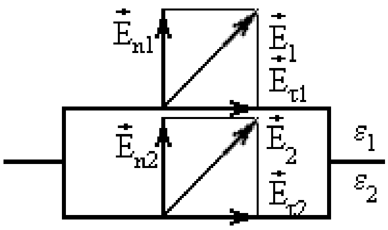
$$D_{n1} = D_{n2}$$

$$\varepsilon_1 E_{n1} = \varepsilon_2 E_{n2}$$

Если σ отсутствует, то нормальная составляющая вектора смещения непрерывна.



Рассмотрим замкнутый контур на границе раздела двух сред (d<<1, l<<1). Найдем циркуляцию вектора напряженности вдоль этого контура. Т. к. d<<l, то циркуляцией на боковых ребрах контура можно пренебречь. Т. к. l мало, на верхнем и нижнем ребре можно пренебречь изменением вектора напряженности.



$$\oint \vec{E}d\vec{r} = E_{\tau 1}l - E_{\tau 2}l = 0$$

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$$

$$\frac{D_{\tau 1}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{\tau 2}}{\varepsilon_2}$$

На границе раздела двух сред тангенциальная составляющая вектора напряженности электростатического поля остается непрерывной.

§5: Электроемкость. Конденсаторы.

Конденсатор это два проводника, разделенные слоем диэлектрика.

Электроемкость (емкость) конденсатора это величина, равная заряду, который нужно перенести с одной обкладки конденсатора на другую, чтобы разность потенциалов между обкладками изменилась на один Вольт.

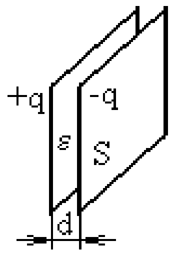
В системе СИ: $[C] = [\Phi] = \left[\frac{Кл}{В}\right]$.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

<u>Примеры:</u>

1. Емкость плоского конденсатора.



Предположим, что размеры пластин много больше расстояния между ними $(d << \sqrt{S})$. В этом случае пластины можно считать бесконечными плоскостями, а поле между пластинами можно считать однородным, т.е. одинаковым во всех точках.

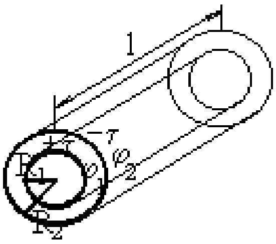
$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = U = \frac{\sigma d}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{qd}{S\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 Sq}{dq} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

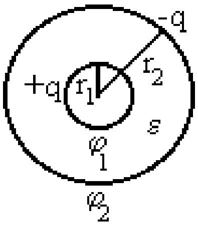
2. Емкость цилиндрического конденсатора.



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{R_2}{R_1}$$

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\tau l}{\frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\frac{R_2}{R_1}}$$

3. Емкость сферического конденсатора.



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{k(r_2 - r_1)q}{\varepsilon r_1 r_2}$$

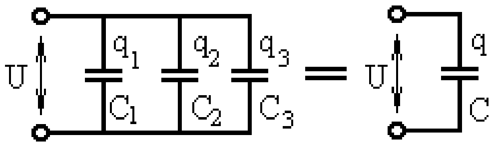
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{(r_2 - r_1)q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}}$$

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}{(r_2 - r_1)} = \frac{\varepsilon r_1 r_2}{k(r_2 - r_1)}$$

Если $r \to \infty$, то получим емкость шара: $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1$.

Емкость при последовательном и параллельном соединении конденсаторов.

1. Параллельное.



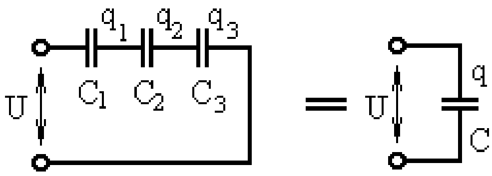
$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

$$CU = C_1U_1 + C_2U_2 + C_3U_3$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

2. Последовательное.



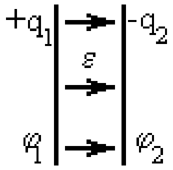
$$q = q_1 = q_2 = q_3$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Энергия конденсатора.



Энергия конденсатора это энергия электростатического поля, сосредоточенного между обкладками конденсатора (или это потенциальная энергия одной обкладки в электростатическом поле, созданном другой обкладкой).

$$W = q_1\varphi_1 = q_2\varphi_2 = \frac{q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2}{2} = \frac{q\varphi_1 - q\varphi_2}{2} = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2}$$

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

Плотность энергии электростатического поля.

Рассмотрим плоский конденсатор.

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

$$U = Ed$$

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_o S E^2 d^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_o E^2}{2} V$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_o E^2}{2}$$

В системе СИ: $[w] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}\right]$.

Вопросы для самопроверки

1.Раскажите об электризации тел. Какие существуют заряды? Что такое элементарный заряд? Величина элементарного заряда. Единица измерения заряда.

2.Сформулируйте закон Кулона.

3.Дайте понятие об электрическом поле.

4.Определение напряженности электрического поля в данной точке пространства. Направление вектора напряженности. Единица измерения.

5.Поток вектора напряженности электрического поля. Единица измерения.

6.Теорема Гаусса, ее физический смысл.

7. Определение потенциала электростатического поля в данной точке пространства. Единица измерения

8.Разность потенциалов. Работа поля, выраженная через разность потенциалов.

9.Теорема о циркуляции электростатического поля.

10.Что такое конденсатор? Какие бывают конденсаторы?

11.Определение электроемкости конденсатора. Единицы измерения.

Лекция 6. Законы постоянного тока

Электрический ток это упорядоченное движение заряженных частиц.

Сила тока это заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за единицу времени. В системе СИ: $[I]=[A]$.

$I=\frac{dq}{dt}$ - мгновенное значение.

$I=\frac{q}{t}$ - среднее значение.

Необходимое условие существования тока:

1) Наличие свободных зарядов (в металлах – электроны, в электролитах – ионы, в газах – ионы и электроны).

2) Наличие электростатического поля, создающего упорядоченное движение свободных зарядов.

Электростатическое поле характеризуется разностью потенциалов на концах проводника.

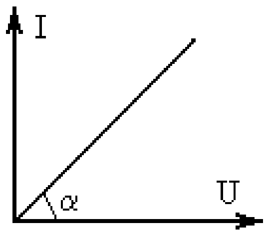
Проводник это вещество, имеющее свободные заряды (металлы, электролиты, ионизированные газы).

Напряжение (разность потенциалов) это работа электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника. В системе СИ: $[U]=[В]=\left[\frac{Дж}{Кл}\right]$.

$$U=\varphi_1-\varphi_2=\frac{A_{эл.п.}}{q}$$

Ом исследовал зависимость силы тока в металлическом проводнике от: 1) напряжения; 2) геометрических размеров проводника; 3) его материала.

Закон Ома.



Сила тока в металлическом проводнике прямо пропорциональна напряжению на концах проводника.

$I \sim U$

Проводимость это коэффициент пропорциональности между напряжением и током. В системе СИ: $[G]=[См]$.

$I=GU$

$G=tg\alpha$

Сопротивление это величина, обратная проводимости (коэффициент пропорциональности между током и напряжением). В системе СИ: $[R]=[Ом]$.

$$R=\frac{1}{G}$$

$$I=\frac{U}{R} \quad U=IR$$

Если при напряжении 1В, сила тока равна 1А, то сопротивление проводника равно 1Ом.

Сила тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Зависимость сопротивления от материала и геометрических размеров проводника.

$$R=\rho\frac{l}{S}$$

ρ - удельное сопротивление. В системе СИ: $[\rho]=[Ом\cdot м]$.

Удельное сопротивление это сопротивление 1м^3 проводника.

Зависимость сопротивления от температуры.

$$R=R_0(1+\alpha t^\circ)$$

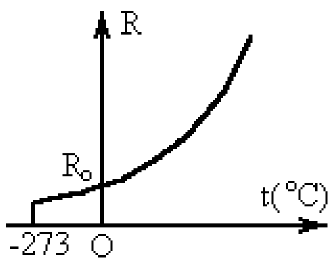
α - температурный коэффициент сопротивления. В системе СИ: $[\alpha]=[град^{-1}]$.

t° - температура в градусах Цельсия. В системе СИ: $[t^\circ]=[^\circ C]$.

R_0 – сопротивление при нулевой температуре.

Явление сверхпроводимости.

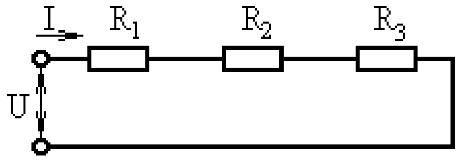
При температуре, близкой к 0 К сопротивление металлического про-



водника скачком **обращается в ноль.**

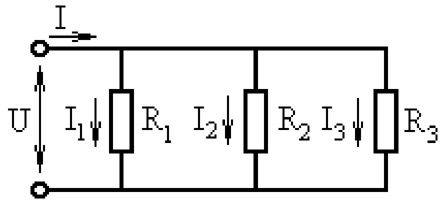
Последовательное и параллельное соединение проводников.

1. Последовательное.



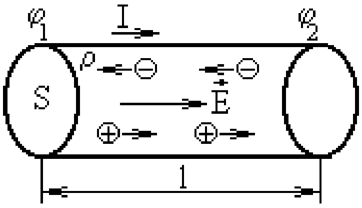
$$I = I_1 = I_2 = I_3$$
$$U = U_1 + U_2 + U_3$$
$$IR = I_1R_1 + I_2R_2 + I_3R_3$$
$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

2. Параллельное.



$$U = U_1 = U_2 = U_3$$
$$I = I_1 + I_2 + I_3$$
$$\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$$
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$
$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

Закон Ома в дифференциальной форме.



За направление электрического тока принимают направление движения положительных зарядов.

Плотность тока это сила тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника. В системе СИ: $[j] = \left[\frac{A}{м^2}\right]$.

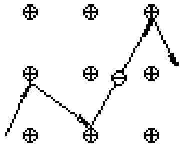
$$j = \frac{I}{S}$$
$$I = jS$$
$$U = El$$

Предполагаем, что внутри проводника поле однородное.

$$R = \rho\frac{l}{S}$$
$$jS = \frac{ElS}{\rho l}$$
$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = g\vec{E}$$

Здесь $g = \frac{1}{\rho}$ - удельная проводимость. В системе СИ: $[g] = \left[\frac{См}{м}\right]$.

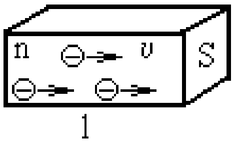
Простейшая микроскопическая теория электрического тока.



Свободные электроны в металлах при движении имеют две составляющие скорости – скорость хаотического движения и скорость упорядоченного движения $\upsilon = \upsilon_{хаот} + \upsilon_{уп}$. Если найти $\langle\upsilon\rangle$, то $\langle\upsilon\rangle=\langle\upsilon_{уп}\rangle$, $\langle\upsilon_{хаот}\rangle=0$. Упорядоченное движение возникает под действием электростатического поля. Электроны при движении сталкиваются с узлами кристаллической решетки. За время свободного пробега (от удара до удара) электрон приобретает скорость (кинетическую энергию) и можно считать, что $\upsilon=a\tau$, τ - среднее время свободного пробега.

$$a=\frac{F_{кл}}{m_e}=\frac{q_0E}{m_e}$$

$$<\upsilon>=\frac{q_0E\tau}{m_e}$$



При столкновении с узлом решетки электрон практически полностью передает свою энергию решетке. Амплитуда колебаний узлов решетки увеличивается, температура тоже увеличивается. Следовательно, при прохождении тока образец нагревается.

$q=q_enSl$ - общий заряд свободных электронов.

$t=\dfrac{e}{<\upsilon>}$ - время, за которое заряд q пройдет через поперечное сечение проводника. Следовательно

$$I=\frac{q}{t}=\frac{q_enSl<\upsilon>}{l}$$

$$j=\frac{I}{S}=q_en<\upsilon>=\frac{q_e^2n\tau}{m_e}E=gE$$

Где $g=\dfrac{g_e^2n\tau}{m_e}$.

Закон Джоуля - Ленца. Работа и мощность тока.

Работа тока это работа электростатического поля, совершенная при перемещении свободных зарядов в проводнике.

$$U=\frac{A_{эл.п.}}{q}\rightarrow A_{эл.п.}=Uq$$

$$I=\frac{q}{t}\rightarrow q=It$$

$$A_{эл.п.}=UIt$$

Если справедлив закон Ома, то

$$A=\frac{U^2}{R}t=I^2Rt=UIt$$

Мощность это работа за единицу времени.

$$P=\frac{A}{t}=UI=\frac{U^2}{R}=I^2R$$

$$A=Q+A_{мех}+A_{хим}+\ldots$$

Если не совершается механическая, химическая и другие виды работы, то работа тока полностью идет на нагревание проводника.

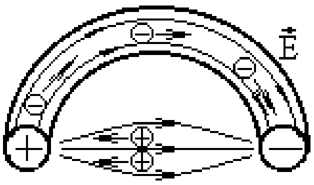
$Q = I^2Rt$ - закон Джоуля – Ленца.

В общем случае $UIt \geq I^2Rt \quad A_{эл.т} \geq Q$.

$\frac{Q}{V} = \frac{E^2}{\rho}t$ - закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.

$$w = \frac{Q}{Vt} = J^2\rho$$

Сторонние силы. ЭДС.



Чтобы в проводнике возник электрический ток, необходимо создать электростатическое поле. Электростатическое поле возникает вокруг заряда. Если зарядить концы проводника, то под действием поля избыточный заряд перейдет с одного конца на другой, возникнет кратковременный ток. Чтобы ток существовал продолжительное время, нужно переносить положительные заряды с отрицательного конца на положительный. Работу по разделению зарядов совершают сторонние силы.

Сторонние силы это любые силы, кроме силы Кулона. Сторонние силы сосредоточены в источнике тока.

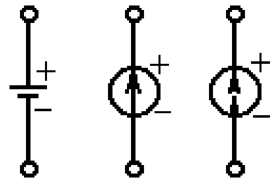
ЭДС это работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда. В системе СИ: $[\varepsilon] = [В] = \left[\frac{Дж}{Кл}\right]$.

$$\varepsilon = \frac{A_{ст.сил}}{q}$$

Всякий реальный источник тока обладает внутренним сопротивлением r. Если через источник идет ток, источник нагревается.

$Q = I^2rt$

$P_r = I^2r$ - мощность, теряемая на нагревание источника.



Закон Ома для неоднородного участка цепи и для замкнутой цепи.

$$A_{\text{эл.п.}} + A_{\text{стор.сил}} = Q$$

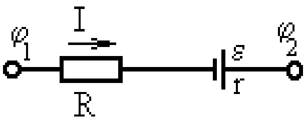
$$Uq + \varepsilon q = I^2 R_c t$$

$$UIt + \varepsilon It = I^2 R_c t$$

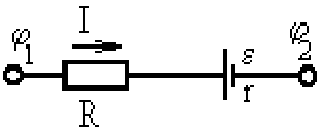
$$U + \varepsilon = IR_c$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{R_c} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{R + r}$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon}{R + r}$$

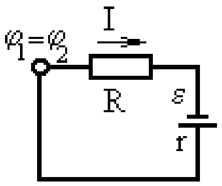


$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) - \varepsilon}{R + r}$$



Закон Ома для замкнутой цепи

Если цепь замкнуть, то



$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

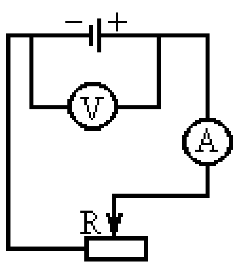
$P_r = I^2 r$ - мощность, теряемая на нагревание источника.

$P_0 = \varepsilon I$ - мощность источника (полная мощность).

$P = UI$ - мощность во внешней цепи (полезная мощность).

$P_0 = P + P_r$

Найдем зависимость полезной мощности от внешнего сопротивления и тока.



$$P = UI = I^2 R = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} R$$

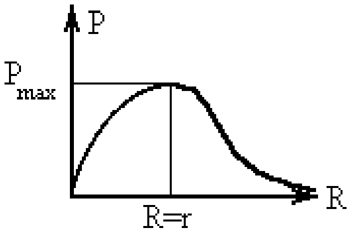
$$P = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} R$$

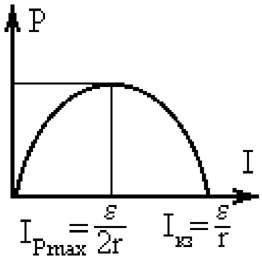
$$P_{max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$

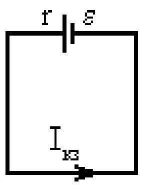
$$P = P_0 - P_r = \varepsilon I - I^2 r = I(\varepsilon - Ir)$$

$$P = I(\varepsilon - Ir)$$

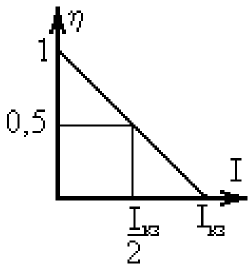
$$I_{p_{max}} = \frac{I_{к.з.}}{2} = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{\varepsilon}{R+r} \Rightarrow R = r$$







Коэффициент полезного действия это отношение полезной работы к затраченной.



$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{P}{P_0} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{R}{R+r} \quad (\cdot 100\%)$$

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{P_0 - P_r}{P_0} = \frac{I(\varepsilon - Ir)}{I\varepsilon} = 1 - \frac{I}{\varepsilon} r$$

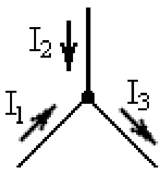
При P=P_{max}, $\eta = 0{,}5$.

Напряжение на зажимах источника: $U = IR$.

Падение напряжения внутри источника:

$U_r = Ir \quad \varepsilon = U + Ur \quad \varepsilon = IR + Ir$

Правила Кирхгофа.



Узел это точка, где соединено более двух проводников.

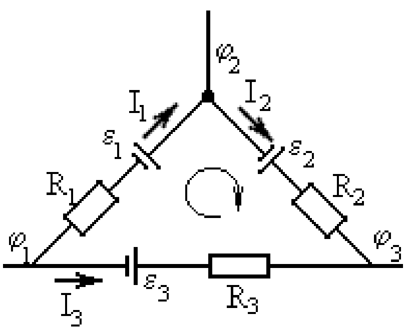
Если ток приходит в узел, берем его со знаком «плюс», если уходит – «минус».

$q_1 + q_2 - q_3 = 0$, если в узле не происходит накапливания заряда, то по закону сохранения заряда:

<u>Первое правило Кирхгофа.</u>

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.

$$\sum_{i=1}^{N} I_i = 0$$



R – полное сопротивление участка цепи.

Запишем закон Ома для каждого неоднородного участка цепи.

$I_1R_1 = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_1$

$I_2R_2 = \varphi_2 - \varphi_3 + \varepsilon_2$

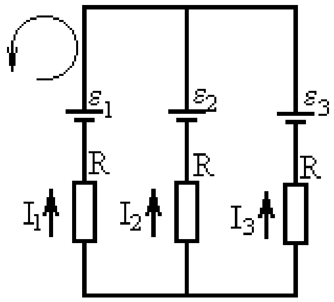
$I_3R_3 = \varphi_3 - \varphi_1 - \varepsilon_3$

Сложим уравнения. Тогда потенциалы сокращаются, и мы получим:

Второй закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма произведений силы тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, суммы берутся вдоль замкнутого произвольного контура. Знаки токов и ЭДС берутся относительно направления обхода контура. Если направление тока совпадает с направлением обхода, то ток положителен, иначе – отрицателен. Аналогично для ЭДС.

$$\sum_i I_iR_i = \sum_i \varepsilon_i$$



Пример.

$R = 1Ом$

$\varepsilon_1 = 1В$

$\varepsilon_2 = 2В$

$\varepsilon_3 = 3В$

1. Произвольно выбрать направление тока в каждом участке.

2. Записать первый закон Кирхгофа для N-1 узлов, где N – число узлов.

$I_1 + I_2 + I_3 = 0$

3. Произвольно выбрать направление обхода контуров. Рассматривать следует только независимые контуры.

4. Записать второй закон Кирхгофа для независимых контуров.

$-I_1R_1 + I_2R_2 = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2$

$-I_2R_2 + I_3R_3 = -\varepsilon_2 + \varepsilon_3$

Получили систему трех уравнений с тремя неизвестными.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 1 + 0 + 1 - 0 - 0 + 1 = 3$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix} = -3$$

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = -1$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 3$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = 1$$

Вопросы для самопроверки

1.Дайте определения понятий и физических величин: электрический ток, сила тока, плотность тока, единица силы тока 1 А.

2.Дайте понятие проводников. Какие частицы являются носителями заряда в проводниках I-го и II-го рода.

3.Назовите необходимые и достаточные условия для прохождения электрического тока в проводнике.

4.Дайте определения разности потенциалов, ЭДС и напряжения. Единицы их измерения. Дайте понятие сторонних сил.

5.Закон Ома для однородного участка.

6.Закон Ома для неоднородного участка цепи.

7.Закон Ома для замкнутой цепи.

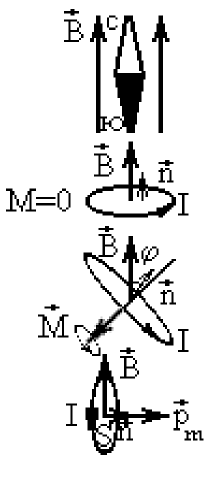
8.Как зависит сопротивление проводника от его размеров.

9.Запишите формулу зависимости сопротивления от температуры.

10.Формулы общего сопротивления при последовательном и параллельном соединении проводников.

Лекция 7. Электромагнитные явления

§1: Индукция магнитного поля.



Если по параллельным проводникам идет ток, то проводники взаимодействуют. Если токи сонаправлены, проводники притягиваются, иначе – отталкиваются. Взаимодействуют не только параллельные токи, но и любые проводники с токами. С современной точки зрения взаимодействие между токами (движущимися зарядами) осуществляется через магнитное поле.

Магнитное поле это форма материи. Оно образуется вокруг движущихся зарядов. Главное свойство магнитного поля – действовать на движущиеся заряды, помещенные в это поле с силой, пропорциональной заряду и его скорости.

Главной силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Его направление можно определить при помощи магнитной стрелки или замкнутого контура с током. Магнитная стрелка ориентируется вдоль вектора магнитной индукции, как показано на рисунке (от юга к северу). Контур с током ориентируется в магнитном поле так, чтобы его плоскость была перпендикулярна магнитному полю. Причем, если смотреть на контур вдоль направления магнитного поля, ток идет по часовой стрелке.

M – вращающий момент, действующий на контур со стороны магнитного поля.

φ - угол между $\vec{n}$ и $\vec{B}$. Чем больше φ, тем больше вращающий момент. Магнитное поле стремится повернуть контур так, чтобы $\vec{M}$ и $\vec{B}$ совпали.

$$M = BISN\sin\varphi$$

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right]$$

Здесь $\vec{p}_m = ISN\vec{n}$ - магнитный момент контура с током. В системе СИ: $[p_m] = [А \cdot м^2]$.

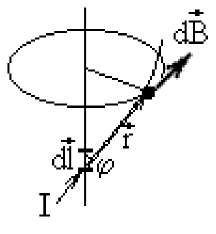
Если $\varphi = 90°$, $M = M_{max}$.

Индукция магнитного поля по модулю равна максимальному вращающему моменту, который действует на контур с единичным магнитным моментом, помещенный в данную точку поля. В системе СИ: $[B] = [Тл] = \left[\frac{Н}{А \cdot м}\right] = \left[\frac{кг}{А \cdot с^2}\right]$.

$$B = \frac{M_{max}}{p_{max}}.$$

§2: Закон Био-Савара- Лапласа.

Индукция магнитного поля, созданного бесконечно малым (элементарным) участком проводника с током, прямо пропорциональна силе тока, длине участка и обратно пропорциональна квадрату расстояния от участка до точки наблюдения. Вектор индукции направлен по касательной к окружности, проведенной через точку наблюдения вокруг продолжения тока, идущего через элементарный участок.



$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\varphi}{r^2}$$

Где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ - магнитная постоянная.

μ - магнитная проницаемость среды. μ показывает, во сколько раз среда изменяет магнитное поле.

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

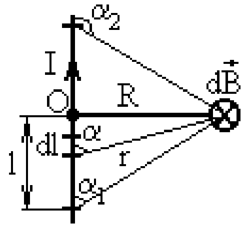
$$d\vec{B}\perp d\vec{l} \quad d\vec{B}\perp\vec{r}$$

Чтобы найти индукцию, созданную всем проводником, нужно проинтегрировать.

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}$$

<u>Примеры:</u>

1. Индукция магнитного поля, созданного отрезком проводника с током.



$$\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{IdlSin\alpha}{r^2}$$

Правило буравчика: если буравчик ввинчивать по направлению тока, то его ручка двигается вдоль направления индукции магнитного поля.

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

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{IdlSin\alpha}{r^2}$$

$$r^2 = R^2 + l^2 \quad Sin\alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + l^2}} \quad l = \frac{R}{tg\alpha}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{Rdl}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}$$

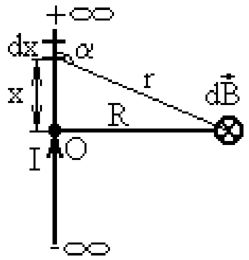
$$d(Sin\alpha) = d\left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + l^2}}\right) \quad Cos\alpha d\alpha = -\frac{1}{2}R\frac{2ldl}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \frac{dl}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} = -\frac{Cos\alpha d\alpha}{Rl} =$$

$$= -\frac{Cos\alpha tg\alpha d\alpha}{R} = -\frac{Sin\alpha d\alpha}{R}$$

$$dB = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \frac{Sin\alpha d\alpha}{R}$$

$$B = \int dB = -\frac{\mu\mu_0}{4\pi R} I \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Sin\alpha d\alpha = -\frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R}(Cos\alpha_1 - Cos\alpha_2)$$

2. Индукция поля, созданного бесконечно длинным прямолинейным проводником с током.



$$dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{Sin\alpha dx}{r^2}$$

$$r^2 = R^2 + x^2 \quad y = \frac{x}{R} \quad Sin\alpha = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{Rdx}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2}\frac{dx}{(1 + (\frac{x}{R})^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{d\frac{x}{R}}{(1 + (\frac{x}{R})^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R}2$$

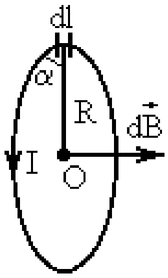
$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$$

Данное выражение можно получить из первого следующим образом:

$\alpha_1 \to 0 \Rightarrow Cos\alpha_1 = 1$

$\alpha_2 \to \pi \Rightarrow Cos\alpha_2 = -1$

3. Индукция поля в центре кругового тока.



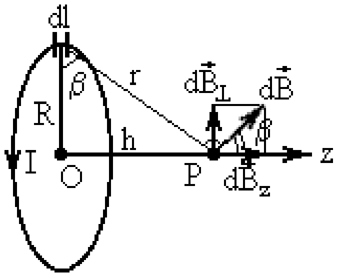
$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{dlSin\frac{\pi}{2}}{R^2}$$

$$B = \oint_l dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2}\oint_l dl = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2}2\pi R$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$$

4. Индукция поля на оси кругового тока.

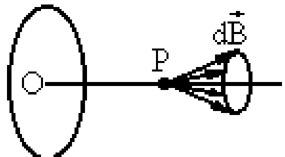


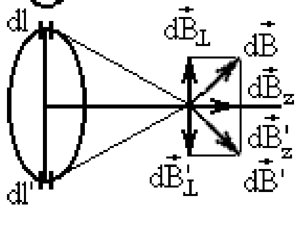
$$d\vec{B} = d\vec{B}_x + d\vec{B}_y + d\vec{B}_z = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_z$$

$$d\vec{B}_\perp = d\vec{B}_x + d\vec{B}_y$$

Вектора $d\vec{B}$, созданные различными участками проводника dl, в точке P образуют конус.

$$\oint_l dB_x = \oint_l dB_y = 0 \Rightarrow \oint_l dB_\perp = 0$$





Для каждого участка dl существует диаметрально противоположный участок dl'. Если сложить вектора $d\vec{B}$ и $d\vec{B}'$, созданные участками dl и dl' соответственно, то составляющие, перпендикулярные оси z, у этих векторов равны и противоположны. Следовательно, в сумме они дают ноль.

$$d\vec{B} + d\vec{B}' = 2d\vec{B}_z$$

$$d\vec{B}_\perp = -d\vec{B}'_\perp$$

Все перпендикулярные оси z составляющие $d\vec{B}$ взаимно сокращаются, остаются только составляющие, параллельные оси z.

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\,Sin\,\frac{\pi}{2}}{r^2}$$

$$r = \sqrt{R^2 + h^2} \qquad Cos\beta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2}}$$

$$dB_z = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\,Cos\beta\,Sin\,\frac{\pi}{2}}{r^2} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{Rdl}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$$

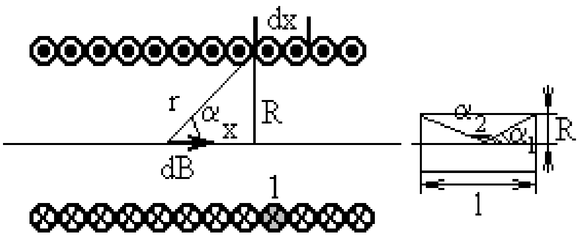
$$B = B_z = \oint_l dB_z = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{R}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}\oint_l dl = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi}\frac{R}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}2\pi R$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2}\frac{R^2}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$p_m = IS = \pi R^2 I$$

$$B = \frac{\mu\mu_o p_m}{2\pi r^3}$$

5. Соленоид конечных размеров.



$$n = \frac{N}{l}$$

$B_1 = \dfrac{\mu\mu_0}{2}\dfrac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$ - индукция, созданная одним витком.

$dB = B_1 n dx$ - индукция, созданная витками, лежащими в интервале dx.

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{2}\frac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}ndx$$

$$x = \frac{R}{tg\alpha} \qquad d(tg\alpha) = d(\frac{R}{x}) \qquad \frac{d\alpha}{Cos^2\alpha} = -\frac{R}{x^2}dx \qquad dx = -\frac{x^2}{R}\frac{d\alpha}{Cos^2\alpha}$$

$$dx = -\frac{R}{tg^2\alpha}\frac{d\alpha}{Cos^2\alpha} = -\frac{Rd\alpha}{Sin^2\alpha}$$

$$(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}} = (R^2 + \frac{R^2}{tg^2\alpha})^{\frac{3}{2}} = R^3(\frac{Sin^2\alpha + Cos^2\alpha}{Sin^2\alpha})^{\frac{3}{2}} = \frac{R^3}{Sin^3\alpha} = r^3$$

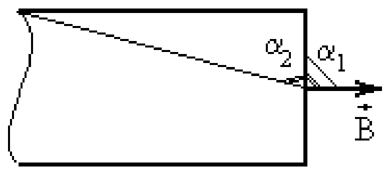
$$dB = -\frac{\mu\mu_0 IR^2 nSin^3\alpha Rd\alpha}{2R^3 Sin^2\alpha} = \frac{\mu\mu_0 InSin\alpha}{2}d\alpha$$

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 In}{2}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Sin\alpha d\alpha = \frac{\mu\mu_0 In}{2}(Cos\alpha_1 - Cos\alpha_2)$$

$B = \dfrac{\mu\mu_0 In}{2}(Cos\alpha_1 - Cos\alpha_2)$ - индукция на оси соленоида конечных размеров.

6. Индукция на оси бесконечно длинного соленоида.

Если соленоид бесконечно длинный, то $\alpha_1=0$, $\alpha_2=\pi$. Следовательно, $\cos\alpha_1=1$, $\cos\alpha_2=-1$. Значит $B=\mu\mu_0 In$.



7. Индукция на конце соленоида бесконечных размеров.

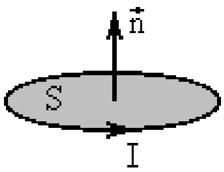
$$\alpha_1=\frac{\pi}{2},\quad \alpha_2=\pi \Rightarrow \cos\alpha_1=0,\quad \cos\alpha_2=-1 \Rightarrow$$

$$B=\frac{1}{2}\mu\mu_0 In$$

Принцип суперпозиции для индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля, созданного системой проводников с токами, равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым проводником в отдельности.

§3: Напряженность магнитного поля. Магнитные свойства вещества. Граничные условия.



Все вещества делятся на три класса по магнитным свойствам: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

Магнитный момент кругового тока это произведение силы тока, на площадь контура, охватываемого этим током. В системе СИ: $[p_m]=[A\cdot м^2]$.

$$\vec{p}_m=IS\vec{n}$$

В классической физике предполагается, что электроны в атоме движутся по замкнутым орбитам (модель Резерфорда). Каждый электрон при своем движении создает замкнутый ток, поэтому атом обладает магнитным моментом.

Намагниченность вещества это вектор, равный векторной сумме магнитных моментов атомов единицы объема вещества.

$$\vec{M}=\frac{\sum\limits_i \vec{p}_{mi}}{V}.$$

Где p_{mi} - магнитный момент i – того атома.

Напряженность магнитного поля это вспомогательная характеристика поля, равная $\vec{H}=\frac{\vec{B}}{\mu_0}-\vec{M}$, $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}\frac{Гн}{м}$ магнитная постоянная.

В системе СИ: $[M]=\left[\frac{A}{м}\right]$, $[H]=\left[\frac{A}{м}\right]$.

$\vec{M}$ определяется собственным магнитным полем вещества, $\vec{H}$ определяется внешним магнитным полем, $\vec{B}$ определяется результирующим полем, т.е. суммой внешнего и собственного поля вещества.

Магнитная восприимчивость это коэффициент пропорциональности между намагниченностью и напряженностью.

$\vec{M} = æ\vec{H}$

В общем случае æ – матрица 3×3.

$M_x = æ_{xx}H_x + æ_{xy}H_y + æ_{xz}H_z$

$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$

$\vec{M} = æ\vec{H}$

$\vec{B} = \mu_0(1 + æ)\vec{H}$.

Магнитная проницаемость μ=1+æ.

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

Магнитная проницаемость показывает во сколько раз вещество изменяет магнитное поле (это утверждение справедливо для однородного, изотропного, бесконечного магнетика).

$\vec{B}_0 = \mu_0\vec{H}$ - индукция магнитного поля в вакууме.

$\vec{B} = \mu\vec{B}_0$ - индукция магнитного поля в веществе.

Наличие границ влияет на магнитное поле.

Диамагнетики это вещества, у которых в отсутствие внешнего магнитного поля магнитный момент атомов равен нулю. При включении внешнего магнитного поля атомы приобретают магнитный момент, направленный против внешнего поля. Намагниченность диамагнетика направлена против внешнего поля и очень мала.

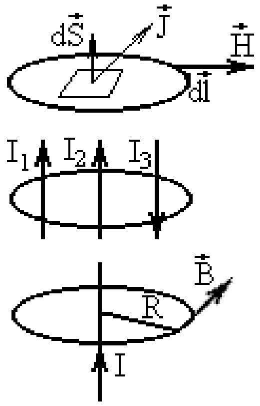
Пусть $\vec{H}$ - напряженность внешнего поля. Тогда $\vec{p}_{mi} \uparrow\downarrow \vec{H}$, $\vec{M} \uparrow\downarrow \vec{H}$, æ<0, μ<1.

Парамагнетики это вещества, у которых в отсутствие внешнего магнитного поля атомы обладают магнитным моментом, но эти моменты направлены хаотично, поэтому в отсутствие внешнего поля намагниченность парамагнетиков равна нулю. Внешнее поле упорядочивает магнитные моменты атомов, появляется намагниченность, направленная по внешнему полю. Если диамагнетики немного ослабляют внешнее поле, то парамагнетики немного его усиливают. Т.е. $\vec{M} \uparrow\uparrow \vec{H}$, æ>0, μ>1.

Ферромагнетики это вещества с недостроенными s и d оболочками (железо, кобальт, никель). Ферромагнетики обладают большой магнитной проницаемостью, т.е. μ>>1, μ~100, μ~10000.

Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля.

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура равна суммарному току, проходящему через произвольную поверхность, ограниченную контуром.



$$\oint \vec{H}d\vec{l} = \int_{l} \vec{J}d\vec{S}$$

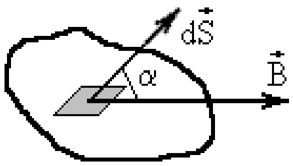
$$\oint \vec{H}d\vec{l} = \sum_{n} J_n$$

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$$

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{I}{2\pi R}$$

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = \frac{I}{2\pi R}\oint dl = \frac{I}{2\pi R}2\pi R = I$$

Теорема Гаусса для вектора индукции магнитного поля.

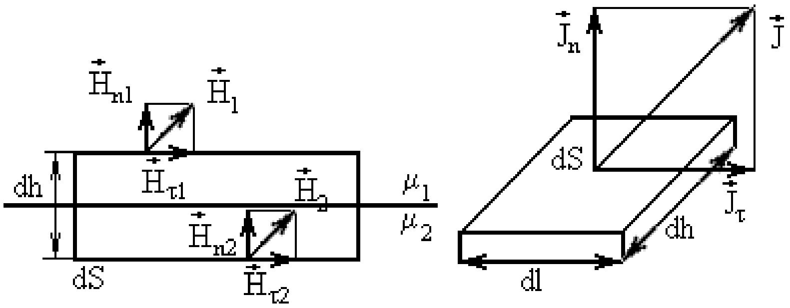


Поток вектора индукции через произвольную замкнутую поверхность всегда равен нулю (в природе не существует магнитных зарядов). Силовые линии магнитного поля либо замкнуты, либо приходят и уходят в бесконечность.

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

Граничные условия для магнитного поля.

1. Рассмотрим границу раздела двух сред.



Возьмем бесконечно малый прямоугольный контур на границе. Запишем теорему о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. Боковые стороны контура бесконечно малы и циркуляцией на них мы пренебрежем.

$$\oint_{l} \vec{H}d\vec{l} = \oint_{S} \vec{J}d\vec{S}$$

$$H_{n1}dl - H_{n2}dl = J_n dS = J_n dl dh$$

$H_{n1} - H_{n2} = J_n dh = J_{лин.пов.}$ - линейная плотность поверхностного тока (это ток, текущий по поверхности раздела на единицу длины этой поверхности).

Если поверхностного тока нет $(J_{лин.пов.} = 0)$, то

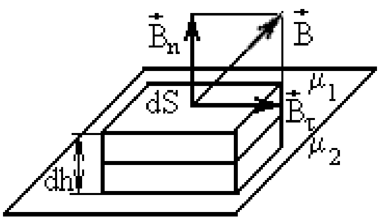
$$H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2}$$

Тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля остается неизменной при переходе через поверхность, на которой нет поверхностных токов.

$$\vec{J}_{лин.пов.} \perp \vec{H}_\tau$$

2. Рассмотрим на границе раздела бесконечно малый параллелепипед.



Найдем поток вектора индукции через параллелепипед.

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

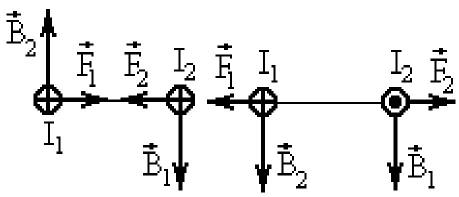
$$B_{1n}dS - B_{2n}dS = 0$$

$$B_{1n} = B_{2n}$$

Нормальная составляющая вектора магнитной индукции при переходе через границу раздела остается неизменной.

§4: Сила Ампера. Сила Лоренца.

Сила Ампера это сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля.



Сонаправленные токи притягиваются, противоположные отталкиваются.

Рассмотрим силу Ампера.

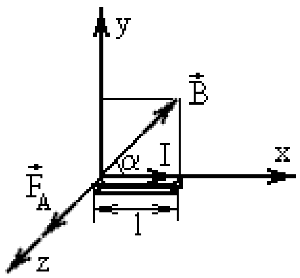
$$\vec{B} \in xy$$

$$\vec{F}_A = I[\vec{l} \times \vec{B}]$$

$$\vec{F}_A = IBlSin\alpha$$

$$\alpha = \angle(\vec{l}, \vec{B})$$

$$\vec{F}_A \perp \vec{l} \quad \vec{F}_A \perp \vec{B}$$



Сила Ампера равна произведению силы тока, модуля индукции магнитного поля, длины проводника и синуса угла между направлением тока и вектора индукции.

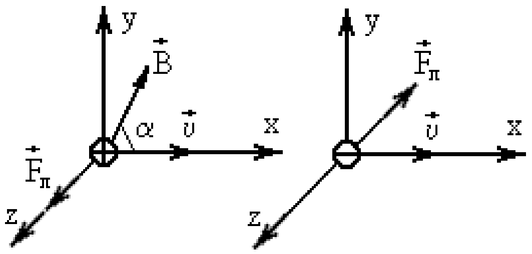
Сила Лоренца это сила, действующая на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле.

$\vec{B} \in xy$

$\vec{F}_Л = q[\vec{\upsilon} \times \vec{B}]$

$\vec{F}_Л = q\upsilon B Sin\alpha \quad \alpha = \angle(\vec{B}, \vec{\upsilon})$

$\vec{F}_Л \perp \vec{\upsilon} \quad \vec{F}_Л \perp \vec{B}$



Сила Лоренца равна произведению заряда на скорость, модуль индукции и синус угла между векторами скорости и индукции.

Получим силу Лоренца из силы Ампера.

$F_A = BIlSin\alpha$

$F_Л = \dfrac{F_A}{N}$ - N – число заряженных частиц, создающих ток.

$N = nlS$

$I = JS$

$J = q\upsilon n$

υ - средняя скорость упорядоченного движения зарядов.

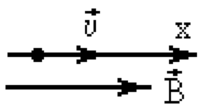
$$F_Л = \frac{F_A}{N} = \frac{IBlSin\alpha}{nlS} = \frac{JSBSin\alpha}{nS} = \frac{q\upsilon nBSin\alpha}{n} = q\upsilon BSin\alpha$$

Сила Ампера есть сумма сил Лоренца, действующих на заряженные частицы, создающие ток.

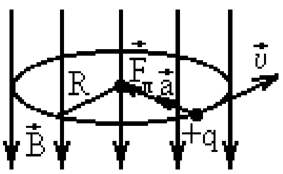
Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости частицы, то она работы не совершает. Сила Лоренца меняет направление скорости и не меняет ее абсолютной величины.

Движение заряженной частицы в магнитном поле.

1. $\vec{\upsilon} \parallel \vec{B}, \quad F_Л = 0$ - равномерное прямолинейное.



2. $\vec{\upsilon} \perp \vec{B}, \quad \alpha = \dfrac{\pi}{2}, \quad Sin\alpha = 1$



$F_Л = q\upsilon B$ создает центростремительное ускорение. Движение происходит по окружности, плоскость которой перпендикулярна $\vec{B}$.

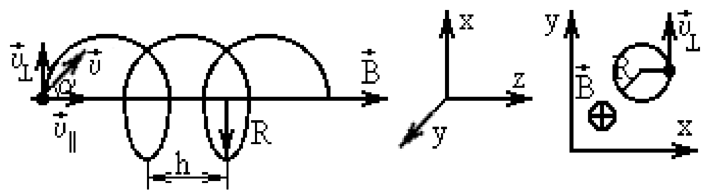
$$ma = F_Л$$

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = q\upsilon B$$

$$m\upsilon = qBR$$

$$R = \frac{m\upsilon}{qB} \quad \upsilon = \frac{qBR}{m} \quad T = \frac{2\pi R}{\upsilon} = \frac{2\pi m}{qB}$$

3. Пусть частица влетает в магнитное поле под углом $\alpha = \angle(\vec{\upsilon}, \vec{B})$. Ча-



стица движется по винтовой траектории.

Движение складывается из движения по окружности радиуса R со скоростью $\vec{\upsilon}_\perp$ и поступательного движения вдоль магнитного поля со скоростью $\vec{\upsilon}_\parallel$.

$$ma = F_Л$$

$$a = \frac{\upsilon_\perp^2}{R} = \frac{(\upsilon \mathrm{Sin}\,\alpha)^2}{R} \quad \upsilon_\parallel = \upsilon \mathrm{Cos}\alpha \quad F_Л = q\upsilon B \mathrm{Sin}\,\alpha = q\upsilon_\perp B$$

$$\frac{m\upsilon_\perp^2}{R} = q\upsilon_\perp B \quad m\upsilon_\perp = qBR$$

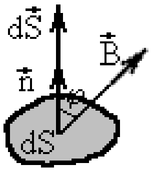
$$R = \frac{m\upsilon_\perp}{qB} = \frac{m\upsilon \mathrm{Sin}\,\alpha}{qB} \quad T = \frac{2\pi R}{\upsilon_\perp} = \frac{2\pi m}{qB} \quad h = \upsilon_\parallel T = \frac{2\pi m\upsilon_\parallel}{qB} = \frac{2\pi m\upsilon \mathrm{Cos}\alpha}{qB}$$

§5. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Явление самоиндукции.

Явление электромагнитной индукции это явление возникновения ЭДС – индукции, если проводник покоится в переменном магнитном поле или движется в постоянном магнитном поле.

ЭДС – индукции возникает в замкнутом контуре, если меняется поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную контуром.

Поток магнитной индукции равен произведению модуля вектора индукции магнитного поля на площадь поверхности, через которую ищется поток, и на косинус угла между вектором индукции и нормалью. В системе СИ: $[\Phi] = [Вб] = [Тл \cdot м^2]$.



$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = BdS\mathrm{Cos}\varphi$$

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

$$\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S BdS\mathrm{Cos}\varphi$$

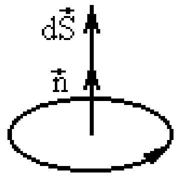
Поток магнитной индукции может меняться если:

1) Меняется магнитное поле, т.е. $\vec{B}$.

2) Меняется площадь поверхности, т.е. S.

3) Меняется ориентация поверхности в пространстве, т.е. φ.

Математическое отступление.



Рассмотрим площадку dS. Выберем положение нормали.

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

Выбор нормали однозначно определяет направление обхода контура (правило буравчика). От выбора нормали зависит знак магнитного потока.

Знак ЭДС и тока определяется по отношению к направлению обхода контура.

Закон Фарадея.

ЭДС – индукции в замкнутом контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

$$<\varepsilon> = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \varepsilon = -N\Phi'$$

Пример:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0 \Rightarrow \varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

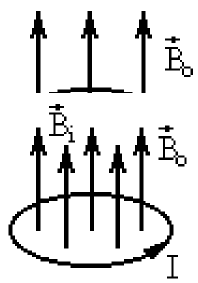
$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \quad \Delta t = t_2 - t_1$$

Правило Ленца.

Магнитное поле индукционного тока стремится скомпенсировать всякое изменение магнитного потока.

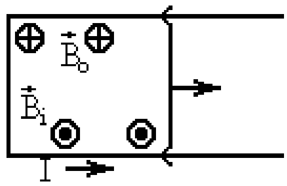
Примеры:

1. $\frac{\Delta B_0}{\Delta t} > 0$.



2. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$.

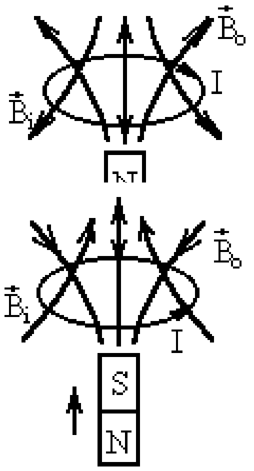
3. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.



4. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.

5. $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.

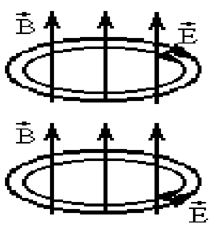
Вывод: 1) Если $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$, то магнитное поле индукционного тока



направлено против внешнего поля; 2) Если $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$, то магнитное поле индукционного тока направлено по внешнему полю.

Две природы ЭДС – индукции.

1. Вокруг переменного магнитного поля образуется вихревое электрическое поле.



$\frac{dB}{dt} > 0$

$\frac{dB}{dt} < 0$

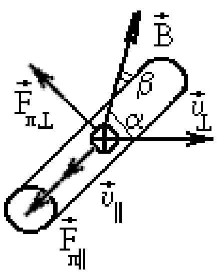
<u>Обобщение закона Фарадея.</u>

Циркуляция вектора $\vec{E}$ вдоль замкнутого контура равна потоку $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ через поверхность, ограниченную контуром, взятую со знаком «минус».

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

2. Если проводник движется в магнитном поле, то на заряды внутри проводника со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. ЭДС – индукции создается параллельно вдоль проводника проекцией силы Лоренца (вторая природа – сила Лоренца).



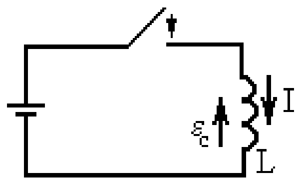
$$\vec{F}_Л = \vec{F}_{Л\perp} + \vec{F}_{Л\parallel}$$

$$F_{Л\parallel} = q\upsilon_\perp B \mathrm{Sin}\,\alpha \quad F_{Л\perp} = q\upsilon_\parallel B \mathrm{Sin}\,\beta$$

$$\varepsilon_i = \frac{A_{F\parallel}}{q} = \upsilon_\perp B \mathrm{Sin}\,\alpha$$

$\varepsilon_i = \upsilon_\perp B\mathrm{Sin}\,\alpha$ - ЭДС – индукции движущегося проводника.

Явление самоиндукции.



Если в проводнике течет электрический ток, то вокруг проводника образуется магнитное поле. Если электрический ток меняется, то меняется магнитное поле, и, следовательно, меняется поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную проводником. По закону Фарадея в проводнике возникает ЭДС, которая называется ЭДС - самоиндукции. ЭДС – самоиндукции вызывает изменение собственного магнитного поля проводника. ЭДС – самоиндукции стремится скомпенсировать всякое изменение тока. Если ток увеличивается, ЭДС – самоиндукции направлена в противоположную току сторону, иначе – сонаправлена.

Полный магнитный поток (потокосцепление): $\Psi = N\Phi$, где Ф – магнитный поток через один виток, N – число витков.

Статический коэффициент самоиндукции это коэффициент пропорциональности между силой тока и полным магнитным потоком вокруг проводника. В системе СИ: $[L] = [Гн] = \left[\frac{Вб}{А}\right] = \left[\frac{В \cdot с}{А}\right] = [Ом \cdot с]$.

$$\Psi = LI$$

$$\varepsilon_i = -N\Phi' = -\Psi' = -(LI)' = -(L'I + LI') = -(\frac{dL}{dt}I + L\frac{dI}{dt}) = -(\frac{dL}{dI}\frac{dI}{dt}L + L\frac{dI}{dt}) = -L^*\frac{dI}{dt}$$

Где $L^* = (L + I\frac{dL}{dI})$ - динамический коэффициент самоиндукции (коэффициент пропорциональности между скоростью изменения тока и ЭДС – самоиндукции).

$$L^* = L \quad (\frac{dL}{dI} = 0)$$

Формула для ЭДС – самоиндукции:

$$\left.\begin{array}{l} < \varepsilon_{is} > = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \\ \varepsilon_{is} = -LI' \end{array}\right\} L \text{ - динамический коэффициент самоиндукции.}$$

Индуктивность соленоида бесконечных размеров.

$$L=\frac{\Psi}{I}\quad \Psi=N\Phi\quad \Phi=BS\quad B=\mu\mu_0 In\quad n=\frac{N}{l}$$

$$L=\frac{\Psi}{I}=\frac{N\Phi}{I}=\frac{NBS}{I}=\frac{\mu\mu_0 NnIS}{I}=\frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}=\mu\mu_0 N^2 V$$

Энергия магнитного поля в катушке индуктивности с током.

$0\le i\le I$

Если катушку замкнуть на источник тока, ток меняется $0\le i\le I$, в катушке возникает ЭДС - самоиндукции, препятствующая возрастанию тока.

$$\varepsilon_{is}=-L\frac{di}{dt}$$

Для создания тока нужно совершить работу, затратить энергию.

$$W=A$$

$$dA=-\varepsilon dq=L\frac{di}{dt}idt=Lidi$$

$$dq=idt$$

W – энергия катушки, A – работа ЭДС – самоиндукции.

$$W=A=\int_0^I Lidi=\frac{LI^2}{2}$$

Энергия катушки индуктивности это энергия магнитного поля внутри катушки.

Плотность энергии магнитного поля.

$$W=\frac{LI^2}{2}\quad V=Sl\quad L=\mu\mu_0\frac{N^2}{l}S\quad n=\frac{N}{l}\quad B=\mu\mu_0 nI$$

$$w=\frac{W}{V}=\frac{LI^2}{2Sl}=\frac{\mu\mu_0 N^2 SI^2}{2Sl^2}=\frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 I^2\frac{\mu\mu_0}{\mu\mu_0}=\frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

В системе СИ: $[w]=\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}\right]$.

§6. Уравнения Максвелла

1. $\oint_l \vec{E}d\vec{l}=-\frac{\partial}{\partial t}\int_S \vec{B}d\vec{S}\quad \mathrm{rot}\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$

Циркуляция вектора напряженности электрического поля вдоль замкнутого контура l равна скорости изменения потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную контуром, со знаком «минус».

$\mathrm{rot}\vec{E}$ равен скорости изменения индукции магнитного поля со знаком «минус».

Физический смысл: переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

2. $\oint\limits_{l} \vec{H}d\vec{l} = \int\limits_{S} (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})d\vec{S} \quad \mathrm{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равна сумме тока проводимости и тока смещения через поверхность, ограниченную контуром.

$\mathrm{rot}\vec{H}$ равен сумме плотности тока проводимости и плотности тока смещения.

Физический смысл: магнитное поле порождается током проводимости и переменным электрическим полем.

Плотность тока смещения это производная по времени от вектора смещения.

$$\vec{J}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

3. $\oint\limits_{S} \vec{B}d\vec{S} = 0 \quad \mathrm{div}\vec{B} = 0$

Поток вектора магнитной индукции через произвольную замкнутую поверхность всегда равен нулю.

$\mathrm{div}\vec{B}$ равна нулю.

Физический смысл: в природе не существует магнитных зарядов, силовые линии магнитного поля замкнуты или приходят и уходят в бесконечность.

4. $\oint\limits_{S} \vec{D}d\vec{S} = \int\limits_{V} \rho dV \quad \mathrm{div}\vec{D} = \rho$

Поток вектора смещения электрического поля через произвольную замкнутую поверхность равен суммарному заряду внутри объема, ограниченного этой поверхностью.

$\mathrm{div}\vec{D}$ равна плотности электрического заряда.

Физический смысл: источниками электростатического поля являются электрические заряды. Силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных зарядах. Или приходят и уходят в бесконечность.

$$\mathrm{rot}\vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = (\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z})\vec{i} + (\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x})\vec{j} + (\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y})\vec{k} =$$

$$= \mathrm{rot}A_x\vec{i} + \mathrm{rot}A_y\vec{j} + \mathrm{rot}A_z\vec{k}$$

$$\mathrm{div}\vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

§7. Система дифференциальных уравнений классической электродинамики

1. Уравнения Максвелла.

$$\mathrm{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\mathrm{div}\vec{B} = 0$$

$$\mathrm{div}\vec{D} = \rho$$

2. Уравнения связи.

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

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

3. Граничные условия.

$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$, $D_{n2} - D_{n1} = \sigma$ - электрическое поле.

$H_{\tau 2} - H_{\tau 1} = J_{пов}$, $B_{n1} = B_{n2}$ - магнитное поле.

4. Уравнение непрерывности.

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\vec{J} = 0$ - ток возникает, если заряды движутся.

5. Закон Ома в дифференциальной форме.

$$\vec{J} = g\vec{E}$$

6. Микроскопические уравнения.

$$\vec{J} = qn\vec{\upsilon}$$

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{\upsilon} \times \vec{B}\right]$$

7. Начальные условия.

Значения физических величин при t=0.

Вопросы для самопроверки

1.Дайте определения индукции и напряженности магнитного поля. Единицы их измерения.

2.Запишите соотношение между индукцией и напряженностью магнитного поля.

3.Каков физический смысл магнитной проницаемости среды?

4.Сформулируйте и запишите закон Био-Савара-Лапласа.

5.Дайте определение потока магнитной индукции, в каких единицах он измеряется.

6.Дать определение силы Лоренца.

7.Как определить направление силы Лоренца? Правило левой руки.

8.В чем заключается явление электромагнитной индукции?

9.Как формулируется и записывается закон Фарадея для электромагнитной индукции?

10.Как формулируется правило Ленца?

11.В чем заключается явление самоиндукции

Глоссарий

Абсолютная деформация – это изменение размеров тела $\Delta l = l - l_0$,

где: l_0 - размер тела до деформации,

l - размер тела после деформации.

Вектор электрического смещения $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$,

где: $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля,

$\vec{P}$ - вектор поляризации,

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \dfrac{Ф}{м}$ - электрическая постоянная.

Вес тела $\vec{P}$ **-** это сила, с которой тело действует на опору или подвес. Если $\vec{N}$ - сила реакции опоры, то $\vec{P} = -\vec{N}$ вес, приложенный к опоре со стороны тела. В общем случае вес не равен силе тяжести.

Градиент – это математический оператор который действуя на скалярную функцию дает вектор

$$grad\varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\vec{k} \right),$$

где: $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные вектора, задающие направление координатных осей OX, OY, OZ

Градиент скалярной функции в данной точке дает направление наибольшего изменения функции в данной точке.

Деформация - это изменение размеров или формы тела.

Диамагнетики - это вещества, у которых в отсутствие внешнего магнитного поля магнитный момент атомов равен нулю. При включении внешнего магнитного поля атомы приобретают магнитный момент, направленный против внешнего поля. Намагниченность диамагнетика направлена против внешнего поля и очень мала.

Динамический коэффициент самоиндукции L – это коэффициент пропорциональности между скоростью изменения силы электрического тока и ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = -L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$.

Диэлектрики - это вещества (материалы), которые внутри себя практически не имеют свободных носителей электрического заряда.

Диэлектрическая проницаемость ε показывает во сколько раз электрическое поле в диэлектрике меньше, чем в вакууме (при условии, что диэлектрик бесконечный и однородный)

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E},$$

где: E - напряженность электрического поля в диэлектрике,

E_0 - напряженность электрического поля в вакууме.

Замкнутая система это система тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в систему.

Импульс силы это вектор, равный произведению вектора силы на время ее действия $d\vec{p} = \vec{F}\mathrm{dt}$.

Индукция магнитного поля по модулю равна максимальному вращающему моменту, который действует на рамку с единичным магнитным моментом, помещенный в данную точку поля

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m},$$

где: B - индукция магнитного поля,

$M_{\max}$ - максимальный вращающий момент, действующий на рамку,

$p_m = ISN$ - магнитный момент рамки,

I – сила тока, S – площадь рамки, N – число витков провода на рамке.

В системе СИ: $[B] = [Тл] = \left[\frac{Н}{А \cdot м}\right]$.

Инертность - это свойство тела изменять свою скорость при взаимодействии не мгновенно, а за конечный промежуток времени.

Инерциальные системы отсчета (ИСО) - это такие системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона. В рамках достигнутой к настоящему времени точности измерений, система отсчета, связанная с Солнцем и неподвижными относительно Солнца звездами, можно считать ИСО. Система отсчета, связанная с Землей, в ряде задач можно считать ИСО приблизительно. Любая система отсчета, которая двигается равномерно и прямолинейно относительно ИСО, также является ИСО.

Инерция - это свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или их действия взаимно скомпенсированы.

Кинетическая энергия - это половина произведения массы тела на квадрат его скорости $E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}$.

Конденсатор - это два проводника, разделенные слоем диэлектрика.

Коэффициент полезного действия (КПД)- это отношение работы полезной к работе затраченной $\eta = \frac{A_{полез.}}{A_{затр.}} \cdot 100\%$. Обычно КПД выражают в процентах.

Один Кулон - это заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока один Ампер ($Кл = А \cdot с$).

Магнитная восприимчивость χ- это коэффициент пропорциональности между намагниченностью и напряженностью $\vec{M} = \chi \vec{H}$.

Магнитная проницаемость μ показывает во сколько раз индукция магнитного поля в веществе больше чем в вакууме (это утверждение справедливо для однородного, изотропного, бесконечного магнетика).

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где: $B_0 = \mu_0 H$ - индукция магнитного поля в вакууме,

H - напряженность магнитного поля.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$ магнитная постоянная.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$.

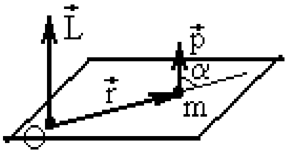
Магнитное поле – это особая форма материи (особая т.к. не регистрируется органами чувств человека). Оно образуется вокруг движущихся зарядов. Главное свойство магнитного поля – действовать на движущиеся заряды, помещенные в это поле с силой, пропорциональной величине заряда и скорости заряда.

Магнитный момент плоского контура (рамки) с током это произведение силы тока, на площадь контура, охватываемого этим током $\vec{p}_m = IS\vec{n}$, где: $\vec{n}$- вектор единичной нормали к плоскости контура. В системе СИ: $[p_m] = [А \cdot м^2]$.

Масса - это количественная мера инертности тела. Чем больше масса, тем медленнее тело изменяет свою скорость при взаимодействии. В системе СИ: $[\mathrm{m}] = [\mathrm{кг}]$.

Материальная точка - это тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Момент импульса материальной точки это вектор, равный векторному произведению радиус-вектора на вектор импульса



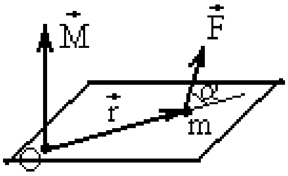
$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$

$L = rp\,Sin\alpha$

$L = rm\upsilon Sin\alpha$

$\vec{L} \perp \vec{r} \quad \vec{L} \perp \vec{p}$

Момент силы - это вектор, равный векторному произведению радиус-вектора на вектор силы.



$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$

$M = rFSin\alpha$

$\vec{M} \perp \vec{r} \quad \vec{M} \perp \vec{F}$

Момент инерции – это мера инертности тела при вращательном движении. Момент инерции материальной точки относительно неподвижной оси вращения равен $J = mR^2$.

Мощность - это работа совершенная за единицу времени $P = \frac{A}{t}$. В СИ работа измеряется в Джоулях $[A] = [Дж]$.

Намагниченность - это вектор, равный векторной сумме магнитных моментов всех атомов в единицы объема вещества $\vec{M} = \frac{\sum_i \vec{p}_{mi}}{V}$.

Напряженность магнитного поля - это вспомогательная характеристика поля, равная $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$. В системе СИ: $[H] = \left[\frac{A}{м}\right]$.

Напряженность электрического поля - это вектор, равный силе, действующей на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ Напряженность это силовая характеристика электростатического поля. Вектор напряженности приписывается к каждой точке пространства, где существует поле. В системе СИ: $[E] = \left[\frac{Н}{Кл}\right] = \left[\frac{В}{м}\right]$.

Неполярные диэлектрики. В отсутствие внешнего электростатического поля молекулы **неполярного диэлектрика** имеют нулевой дипольный момент, то есть центры положительного и отрицательного зарядов совпадают. Внешнее поле поляризует молекулу, то есть центры положительных зарядов смещаются по полю, отрицательных – против поля. Молекула приобретает дипольный момент.

Нормальное ускорение - это проекция вектора ускорения на ось, перпендикулярную вектору скорости и направленную к радиусу кривизны траектории. Нормальное ускорение описывает изменение скорости по направлению $a_н = \frac{\upsilon^2}{R}$, где R – радиус кривизны траектории.

Относительная деформация – это отношении абсолютной деформации к исходному размеру тела $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$.

Парамагнетики - это вещества, у которых в отсутствие внешнего магнитного поля атомы обладают магнитным моментом, но эти моменты направлены хаотично, поэтому в отсутствие внешнего поля намагниченность парамагнетиков равна нулю. Внешнее поле упорядочивает магнитные моменты атомов, появляется намагниченность, направленная по внешнему полю. Если диамагнетики немного ослабляют внешнее поле, то парамагнетики немного его усиливают. Т.е. $\vec{M} \uparrow\uparrow \vec{H}$, æ>0, μ>1.

Перемещение - это вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела $\Delta\vec{r} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k}$.

Плотность тока - это сила тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника $j = \frac{I}{S}$. В системе СИ: $[j] = \left[\frac{A}{м^2}\right]$.

Полная механическая энергия – это сумма кинетической и потенциальной энергий тела $E = E_к + E_п$.

Поляризуемость α – это коэффициент пропорциональности между напряженностью электрического поля $\vec{E}$ и поляризацией диэлектрика $\vec{P}$

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}.$$

здесь $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$ электрическая постоянная вводится для согласования размерности.

Полярные диэлектрики. При отсутствии внешнего электростатического поля молекулы **полярного диэлектрика** имеют дипольный момент, но тепловое движение располагает эти дипольные моменты хаотично. Внешнее электрическое поле упорядочивает дипольные моменты, тем самым, поляризуя диэлектрик.

Потенциал электростатического поля в данной точке пространства равен потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда, помещенного в данную точку поля $\varphi = \frac{W_п}{q}$,

в системе СИ: $[\varphi] = \left[\frac{Дж}{Кл}\right] = [В]$.

Потенциальная энергия. Для потенциальных сил вводится понятие потенциальной энергии таким образом, чтобы работа потенциальной силы была равна изменению потенциальной энергии со знаком «минус»

$$dA = -dE_п$$
$$A = -\Delta E_п = E_{п1} - E_{п2}$$

Поток вектора напряженности электрического поля через площадку $d\vec{S}$ равен скалярному произведению векторов $\vec{E}$ и $d\vec{S}$

$$d\Phi = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = EdSCos\,\varphi$$
$$\Phi = \int (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int EdSCos\,\varphi$$

где $d\vec{S} = dS\vec{n}$ вектор элементарной площадки,

$\vec{n}$ - вектор единичной нормали к площадке,

dS - площадь,

в системе СИ: $[\Phi] = [B \cdot м]$.

Проводимость G - это коэффициент пропорциональности между напряжением и силой тока $I = GU$. В системе СИ проводимость измеряется в Сименсах $[G] = [См]$.

Проводник - это материал, имеющий внутри себя свободные носители заряда. В металлах – валентные электроны, в электролитах – ионы, в ионизированных газах – ионы и электроны.

Путь - это длина траектории. В системе СИ путь измеряется в метрах.

Работа тока - это работа электрического поля, совершенная при перемещении свободных зарядов в проводнике $A_{эл.п.} = UIt$. Если справедлив закон Ома, то $A = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt = UIt$.

Равнодействующая сила - это вектор, равный векторной сумме сил, приложенных к телу $\vec{F}_{равд.} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$.

Радиус-вектор - это вектор, соединяющий начало координат и точку, где находится тело $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$.

Сила - это векторная величина, которая является мерой взаимодействия тел. Вектор силы направлен вдоль ускорения, приобретаемого телом под действием силы. По модулю сила равна произведению массы тела на модуль его ускорения $\vec{F} = m\vec{a}$. В системе СИ: $[F] = [H] = \left[\frac{кг \cdot м}{c^2}\right]$.

Сила Ампера - это сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля

$$\vec{F}_A = I\left[\vec{l} \times \vec{B}\right]$$
$$F_A = IBl\sin\alpha$$
$$\alpha = \angle(\vec{l}, \vec{B})$$
$$\vec{F}_A \perp \vec{l} \quad \vec{F}_A \perp \vec{B}$$

Сила Лоренца - это сила, действующая на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле

$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{\upsilon} \times \vec{B}\right]$$

$$F_Л = q\upsilon B \sin\alpha$$

$$\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{\upsilon})$$

$$\vec{F}_Л \perp \vec{\upsilon} \quad \vec{F}_Л \perp \vec{B}$$

Сила тока - это заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за единицу времени. В системе СИ: $[I] = [A]$.

$I = \frac{dq}{dt}$ - мгновенное значение, $I = \frac{q}{t}$ - среднее значение.

Сила трения - возникает на поверхности соприкосновения тел.

Сила трения скольжения $F_{тр.с.} = \mu_{ск} N$, где $\mu_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

Система отсчета - это тело отсчета, жестко связанная с ним система координат и прибор для измерения времени (в системе СИ время измеряется в секундах).

Скорость - это вектор, равный перемещению тела за единицу времени. **Средняя скорость** - это скорость, определяемая за конечный промежуток времени $\vec{\upsilon}_{ср} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$. **Мгновенная скорость** - это скорость, определяемая за бесконечно малый промежуток времени $\vec{\upsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}\,'$.

Соленоид полагают бесконечно длинным, если его длина l много больше его диаметра d. Индукция магнитного поля на оси бесконечно длинного соленоида $B = \mu_0 \mu I n$, где $n = \frac{N}{l}$ число витков на единицу длины.

Сопротивление - это коэффициент пропорциональности между током и напряжением $U = RI$ (величина, обратная проводимости $R = \frac{1}{G}$). В системе СИ: $[R] = [Ом]$.

Статический коэффициент самоиндукции - это коэффициент пропорциональности между силой тока и полным магнитным потоком вокруг проводника $\Psi = N\Phi = LI$. В системе СИ измеряется в Генри $[L] = [Гн]$.

Сторонние силы - это любые силы, кроме сил электростатического происхождения (т.е. кроме сил Кулона). Сторонние силы как правило, но необязательно сосредоточены в источнике электрического тока.

Тангенциальное ускорение - это проекция вектора ускорения на вектор скорости. Тангенциальное ускорение описывает изменение скорости по модулю $a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}$.

Тело отсчета - это тело, относительно которого определяется положение и движение в пространстве других тел.

Траектория - это линия, вдоль которой двигается тело (материальная точка).

Угловая скорость - это вектор, направленный вдоль оси вращения и равный по модулю углу поворота за единицу времени $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$. В системе СИ: $[\omega] = \left[\frac{рад}{с}\right]$.

Угловое ускорение - это вектор, направленный вдоль оси вращения и равный по модулю изменению угловой скорости за единицу времени $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$. В системе СИ: $[\varepsilon] = \left[\frac{рад}{с^2}\right]$.

Узел - это точка, где соединено более двух проводников.

Ускорение - это вектор, равный изменению вектора скорости за единицу времени. Ускорение бывает среднее и мгновенное. Среднее ускорение это ускорение, определяемое за конечный промежуток времени

$$\vec{a}_{ср} = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0}{\Delta t}.$$

Мгновенное ускорение это ускорение, определяемое за бесконечно малый промежуток времени.

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} = \vec{\upsilon}'$$

В системе СИ: $[a] = \left[\frac{м}{с}\right]$.

Ферромагнетики - это вещества с недостроенными s и d оболочками (железо, кобальт, никель, т.д.). Ферромагнетики обладают большой магнитной проницаемостью, т.е. $\mu >> 1$, $\mu \sim 100 \div 10000$.

Центр масс - это точка, через которую должна проходить линия действия силы, чтобы под действием этой силы тело двигалось поступательно.

ЭДС (электродвижущая сила) - это работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда $\mathcal{E} = \frac{A_{ст.сил}}{q}$. В системе СИ: $[\mathcal{E}] = [В] = \left[\frac{Дж}{Кл}\right]$.

Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{Ф}{м}$.

Электрический ток - это упорядоченное движение заряженных частиц (электронов, протонов, ионов, и т.д).

Электрическое поле – это особая форма материи (особая т.к. не регистрируется органами чувств человека). Электрическое поле образуется вокруг зарядов. Главное свойство электрического поля – действовать на заряды, помещенные в поле с силой, пропорциональной величине заряда. Электрическое поле является посредником при взаимодействии двух зарядов.

Электростатическое поле – это электрическое поле постоянное во времени.

Электроемкость (емкость) конденсатора - это величина, равная заряду, который нужно перенести с одной обкладки конденсатора на другую, чтобы разность потенциалов между обкладками изменилась на один Вольт

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

В системе СИ: $[C] = [\Phi] = \left[\frac{Кл}{В}\right]$.

Элементарный заряд - это наименьший электрический заряд встречающийся в Природе в свободном состоянии. Элементарный заряд имеют электрон и протон: $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Кл*, $\mathrm{p} = +1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Кл*.

Явление электромагнитной индукции - это явление возникновения ЭДС – индукции, если проводник покоится в переменном магнитном поле или движется в постоянном магнитном поле.

Предметный указатель

абсолютная деформация, 16
вектор электрического смещения, 36
Вес тела, 15
градиент, 41
Деформация, 16
Диамагнетики, 60
динамический коэффициент самоиндукции, 67
Диэлектрики, 34
Диэлектрическая проницаемость, 35
Замкнутая система, 19
Импульс силы, 13
Индукция магнитного поля, 55
Инертность, 12
Инерциальные системы отсчета, 12
Инерция, 12
Кинетическая энергия, 20
Конденсатор, 43
Коэффициент полезного действия, 52
коэффициент трения покоя, 17
коэффициент трения скольжения, 17
коэффициент упругости, 16
Кулон, 27
Магнитная восприимчивость, 60
магнитная постоянная, 56, 59
Магнитная проницаемость, 60
Магнитное поле, 55
Магнитный момент, 59
Масса, 12
Материальная точка, 5
модуль Юнга, 17

Момент импульса, 24
Момент силы, 24
Моменты инерции, 25
Мощность, 50
Намагниченность, 59
Напряженность магнитного поля, 59
Напряженность электрического поля, 27
неполярные, 34
Нормальное ускорение, 7
относительная деформация, 16
Парамагнетики, 60
Перемещение, 6
Плотность тока, 48
полная механическая энергия, 23
поляризуемость, 36
полярные, 34
Потенциал, 38
потенциальная энергия, 38
Потенциальная энергия, 21
Поток вектора напряженности, 28
Проводимость, 47
Проводник, 33, 46
Путь, 5
Работа тока, 49
Равнодействующая сила, 13
Радиус-вектор, 5
Сила, 12
Сила Ампера, 62
Сила Лоренца, 63
Сила тока, 46
Сила трения, 17
Сила трения скольжения, 17
Система отсчета, 5
Скорость, 6
Соленоид, 58
Сопротивление, 47
Статический коэффициент самоиндукции, 67
Сторонние силы, 50
Тангенциальное ускорение, 7
Тело отсчета, 5
температурный коэффициент, 47
Траектория, 5
Угловая скорость, 9
Угловое ускорение, 9
удельная проводимость, 49
удельное сопротивление, 47
Узел, 52
Ускорение, 7
Ферромагнетики, 61
Центр масс, 19
ЭДС, 50
электрическая постоянная, 27
Электрический ток, 46
Электрическое поле, 28
Электроемкость, 43
элементарный заряд, 27
Явление электромагнитной индукции, 64

Список литературы

Основная литература

1. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. — М.: Академия, 2014.
2. *Трофимова Т.И.* Курс физики — М.: Академия, 2014.

3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. — М.: КноРус, 2012.
4. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.— М.: КноРус, 2012
5. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. М.: КноРус, 2012.
6. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. — М.: Абрис, 2013.

Дополнительная литература

1. *Калашников С.Г.* Электричество. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
2. *Трофимова Т.И.* Сборник задач по курсу физики. — М.: Высшая школа, 2004.