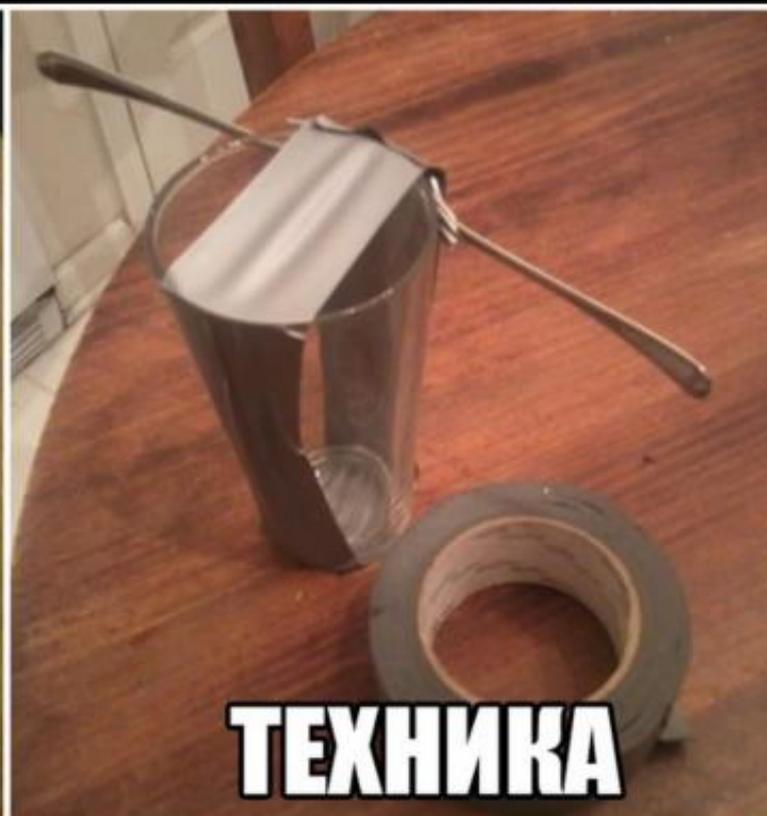
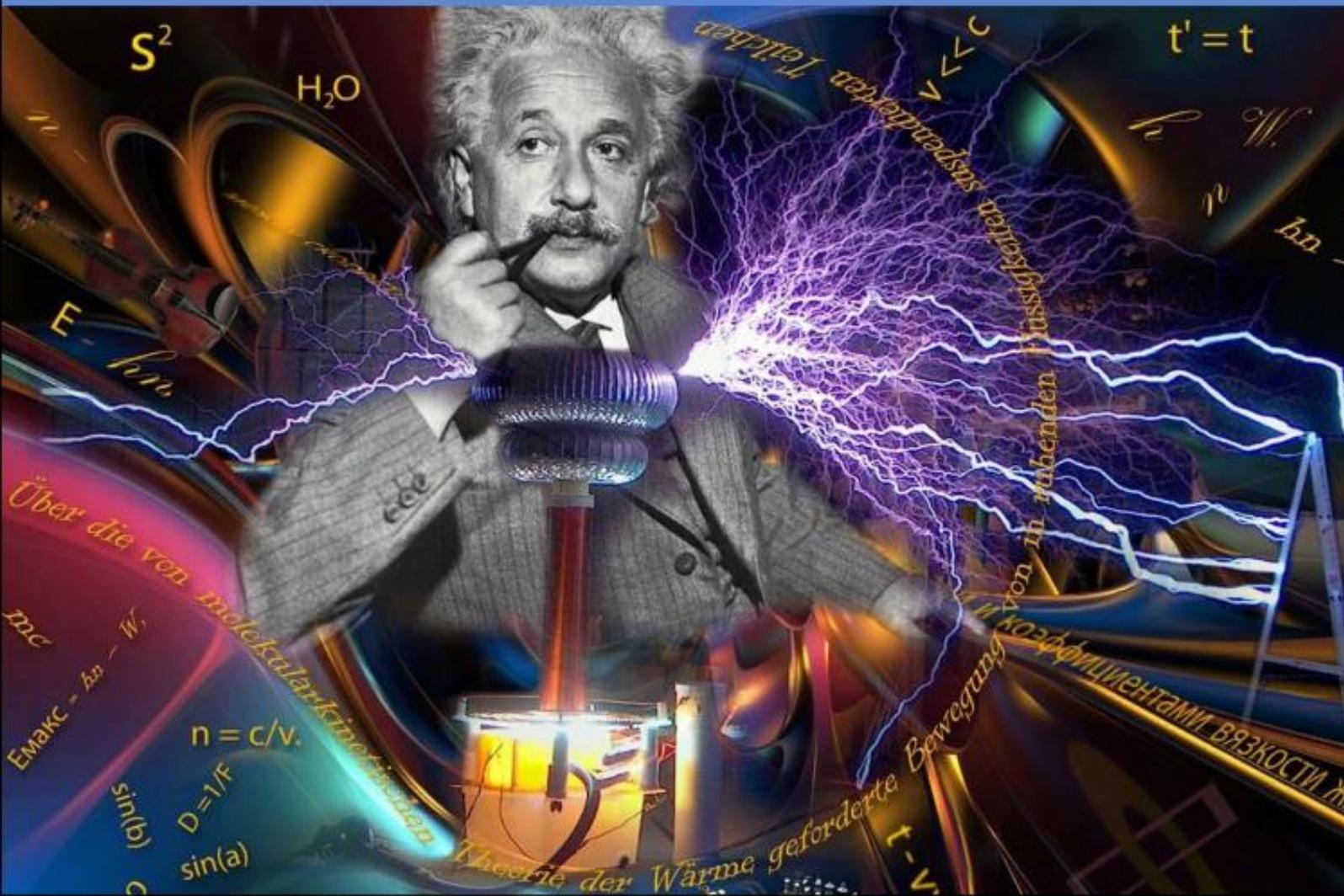
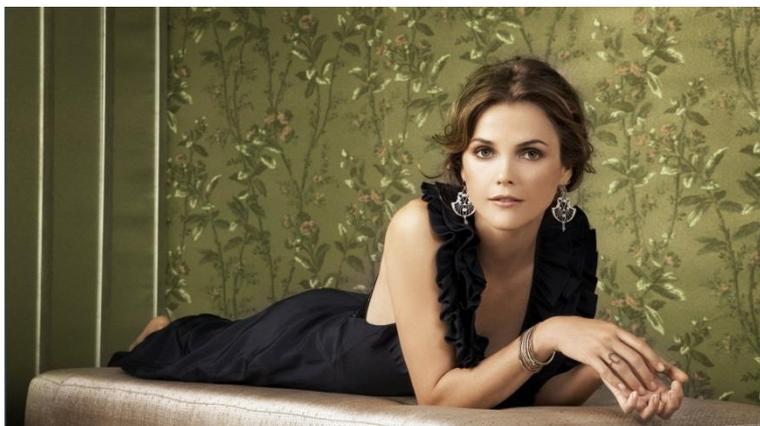


# ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ





**Студент, запомни!!!**

Преподаватель физики - человек с железным алиби: всех тех, на кого он ссылается, давно уже нет в живых...

### Зачем усложнять жизнь?

Скучаешь по кому-то?..... ~~Позвони~~ Решай физику

Хочешь встретиться?..... ~~Позови~~ Решай физику

Тебя не понимают?..... ~~Объясни~~ Зато ты понимаешь физику

Есть вопросы?..... ~~Спроси~~ Значит плохо знаешь физику

Не нравится что-то?..... ~~Заяви~~ Представь, что это материальная точка

Нравится что-то?..... ~~Укрепи~~ Стоит задуматься, если это не физика

Хочется чего-то?..... ~~Попроси~~ Пофиг, решай физику

Любишь кого-то?..... ~~Скажи~~ Пофиг, решай физику



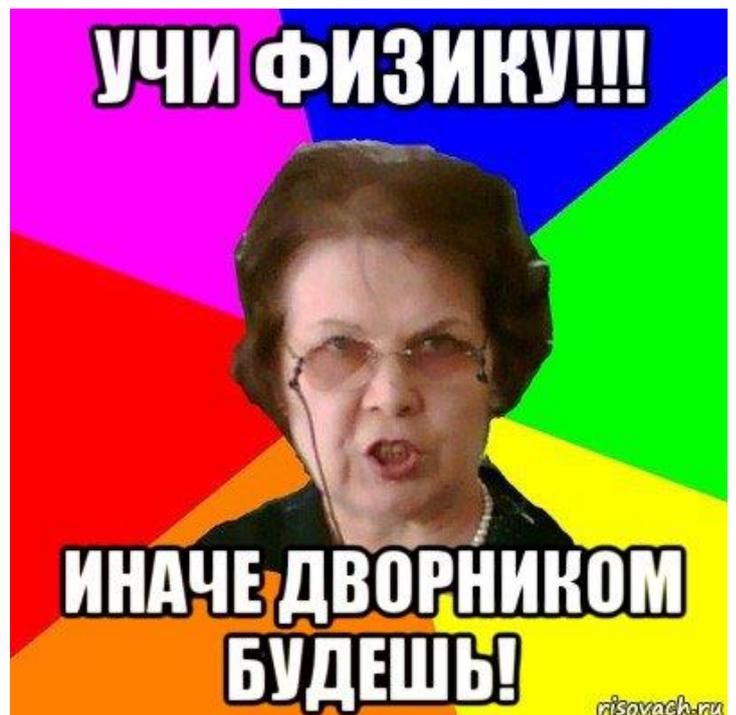
**НАДО БЫЛО ДУМАТЬ**  
куда поступал

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Электростатика

Электрическое поле	4
Закон сохранения электрического заряда	5
Основные характеристики электростатического поля	6
Графическое изображение электростатического поля	7
Закон Кулона	8
Напряжённость и потенциал электрического поля точечного заряда	9
Принцип суперпозиции для электростатического поля	10
Потенциальная энергия зарядов $W$ в электрическом поле	11
Связь между напряжённостью $\vec{E}$ и потенциалом $\varphi$	12
Работа сил электростатического поля по перемещению точечного заряда	12
Поток вектора $\vec{E}$ и вектора $\vec{D}$	13
Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме и в веществе	14
Электрический диполь	15
Ёмкость уединённого проводника. Конденсаторы	16
Энергия электрического поля уединённого проводника и конденсатора	18
Виды соединения конденсаторов	19
Схема решения задач на соединение конденсаторов	20
Проводники в электростатическом поле	21
Диэлектрики в электростатическом поле	23
Гимнастика для ума	25
<b>СТРАНИЧКА КРАСОТЫ</b>	<b>29</b>
<b>Постоянный ток</b>	<b>30</b>
Основные характеристики тока	30
Электродвижущая сила (ЭДС). Напряжение.	31
Законы Ома	33
Работа и мощность постоянного тока на участке электрической цепи	35
Закон Джоуля – Ленца	35
Полезная и затраченная работа и мощность источника тока	36
КПД источника тока	37
Виды соединения сопротивлений	37
Правила Кирхгофа для цепей постоянного тока	39
<b>МОЗГОломка №2 «Туристы»</b>	<b>40</b>
Схема решения задач на законы постоянного тока	41
<b>Магнетизм</b>	<b>42</b>
Основные характеристики магнитного поля	42
Взаимодействие магнитов	43
Графическое изображение магнитных полей	44
Силовое взаимодействие параллельных проводников с током	46
Гимнастика для ума	46
Магнитное поле проводника с током	47
Магнитное поле прямолинейного бесконечно длинного проводника с током	48
Магнитное поле в центре кругового витка с током	48
Принцип суперпозиции для магнитного поля	49
Сила Ампера	49
Сила Лоренца	50
Движение заряженных частиц в магнитном поле	51
Силовое воздействие магнитного поля на плоский контур с током	51
Закон Био - Савара - Лапласа	52
Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком прямолинейного проводника	53
Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямолинейным проводником с током	53
Потенциальная (механическая) энергия контура с током в магнитном поле	53

Циркуляция вектора $\vec{B}$	54
Закон полного тока для магнитного поля в вакууме	54
Закон полного тока в веществе	54
Элементарный магнитный поток (поток магнитного поля)	55
Поток однородного магнитного поля через плоскую поверхность	55
Поток магнитного поля через произвольную поверхность	55
Опыты Фарадея	55
Закон Фарадея для электромагнитной индукции	56
Правило Ленца	56
Правило знаков для ЭДС индукции	57
ЭДС индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле	57
Индуктивность контура	58
Явление самоиндукции	59
Закон Фарадея для явления самоиндукции	59
Соединение проводящих контуров	59
Работа сил магнитного поля по перемещению проводника или контура с током	60
Энергия магнитного поля контура или соленоида с током	60
Схема решения задач на взаимодействие магнитного поля с проводником с током и движущимися зарядами	61
Схема решения задач на явление электромагнитной индукции и самоиндукции	61
Магнитные свойства вещества. Магнетики	62
Гипотеза Ампера	64
Ток смещения	66
Уравнения Максвелла в интегральной форме	67
Уравнения Максвелла в дифференциальной форме	69
Электромагнитные волны	70
Шкала электромагнитных волн	71
Свет и цвет	72
<b>КРАСОТА ПРИРОДЫ</b>	<b>73</b>
<b>СТРАНИЧКА КРАСОТЫ</b>	<b>74</b>
<b>ПОЛЕЗНАЯ ИНФОРМАЦИЯ</b>	<b>75</b>



## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

**Электростатикой** называется раздел электродинамики, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

**Электрический заряд**  $q$  – это скалярная величина, которая характеризует силу электромагнитного взаимодействия.

**Точечным** называется заряд, размером и формой которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий подобно тому, как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Бывают частицы без электрического заряда, но не существует заряда без частицы. Единица электрического заряда – Кл (Кулон) (в честь французского ученого Кулона Шарля Огюстена) Обозначение –  $q$  (ку).

Существует два вида электрического заряда – положительный и отрицательный.

Минимальным положительным зарядом обладает протон  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Минимальным отрицательным зарядом обладает электрон  $e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Электрический заряд любого тела дискретен, то есть составляет целое кратное от элементарного электрического заряда  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , то есть  $q = N e$ .

Суммарный заряд атома или молекулы складывается из зарядов протонов и электронов, входящих в их состав.

Макроскопические тела, состоящие из нейтральных атомов, то же электрически нейтральны.

Нарушение электронейтральности возможно при удалении электронов из электронных оболочек атомов (тогда атом превращается в положительный ион  $+q$ ) или при добавлении электронов к электронным оболочкам атомов (тогда атом превращается в отрицательный ион  $-q$ ).

Обозначение  $Li^+$  или  $Li^-$  означает однократно ионизированный положительный ( $Li^+$ ) и отрицательный ( $Li^-$ ) ионы.

Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые – притягиваются.



## Электрическое поле

*Электрическим полем* называется особый вид материи, не воспринимаемый органами чувств человека и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы и тела.

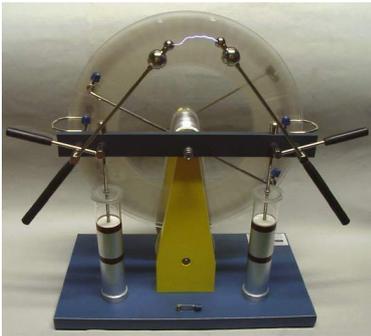
Главное свойство электрического поля – это силовое воздействие на электрические заряды. По действию на заряд устанавливают существование поля, распределение его в пространстве, изучают его характеристики.

Сила, с которой электрическое поле действует на внесенный в него электрический заряд, называется электрической силой.

Согласно теории Фарадея, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот.

По мере удаления от заряда поле ослабевает.

## Закон сохранения электрического заряда



*Электрически изолированной* называется система, которая не обменивается с внешними телами электрическим зарядом

В результате взаимодействия тел внутри электрически изолированной системы заряды перераспределяются между телами. Полный заряд такой системы не изменяется.



Для электрически изолированной системы справедлив **закон сохранения электрического заряда:**

*Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы не изменяется при любых процессах, происходящих в этой системе, то есть*

$$\sum q_i = const \quad \text{или} \quad \sum q_{0i} = \sum q_i$$

### Высказывание:

Благодаря усилиям наших физиков был создан закон сохранения энергии, первый постулат которого гласит:

— Уходя, гасите свет!

## Основные характеристики электростатического поля

**Электростатическим** называется электрическое поле, характеристики которого не изменяются с течением времени.

(такое поле создаётся неподвижными электрическими зарядами).

### Напряженность электрического поля $\vec{E}$ .

(является силовой характеристикой электрического поля)



**Напряженностью электрического поля  $\vec{E}$**  (е) называется векторная величина, равная отношению силы  $\vec{F}_{\text{ЭП}}$ , действующей со стороны электрического поля на произвольный положительный точечный заряд  $q$  в данной точке поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{ЭП}}}{q},$$

$$[E] = \frac{H}{Kл} \equiv \frac{B}{m}, \text{ Ньютон на Кулон или Вольт на метр} \quad (1)$$

(пр.,  $E = 10 \frac{H}{Kл}$  означает, что на точечный заряд в  $1 Kл$  в данной точке поля действует сила  $10 H$ ).

Из уравнения (1) следует, что  $\vec{F}_{\text{ЭП}} = q\vec{E}$  - сила, действующая на заряд  $q$  в данной точке поля.

### Потенциал электростатического поля $\varphi$

(является энергетической характеристикой электрического поля)

Наблюдения показывают, что отношение потенциальной энергии  $\Pi$  точечного заряда в данной точке электростатического поля к величине этого заряда  $q$  остаётся величиной постоянной и не зависит от величины помещённого в поле заряда. Это позволяет ввести новую количественную характеристику, которая не зависит от величины заряда, помещённого в поле. Её назвали потенциалом электростатического поля.

**Потенциалом электростатического поля  $\varphi$**  (фи) называется скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии  $\Pi$  произвольного точечного заряда  $q$  в данной точке электрического поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{\Pi}{q}, \quad [\varphi] = \frac{Дж}{Kл} = B, \text{ Вольт}, \quad (2)$$

(пр.,  $\varphi = 10 B$  означает, что точечный заряд в  $1 Kл$  в данной точке электрического поля имеет потенциальную энергию равную  $1 Дж$ ).

Из уравнения (2) следует, что

$\Pi = q\varphi$  - потенциальная энергия заряда в данной точке поля.

Практическое значение имеет не сам потенциал в точке, а изменение потенциала, которое не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала.



## Графическое изображение электростатического поля

Электростатические поля графически можно изображать:

1. с помощью *силовых линий*,
2. с помощью *экипотенциалей*.

**Силовой линией электрического поля** называется линия, касательная в каждой точке которой совпадает по направлению с вектором  $\vec{E}$  в данной точке поля.

(за направление вектора  $\vec{E}$  приняли направление, совпадающее с вектором силы  $\vec{F}$ , действующей на положительный точечный заряд в данной точке поля).

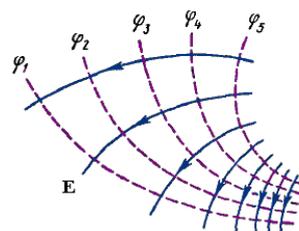


**Экипотенциалью** называется геометрическое место точек с одинаковым потенциалом  $\varphi$ .

В реальности таких линий не существует. Они введены лишь для наглядности представления распределения электрического поля в пространстве.

### Свойства силовых линий и экипотенциалей

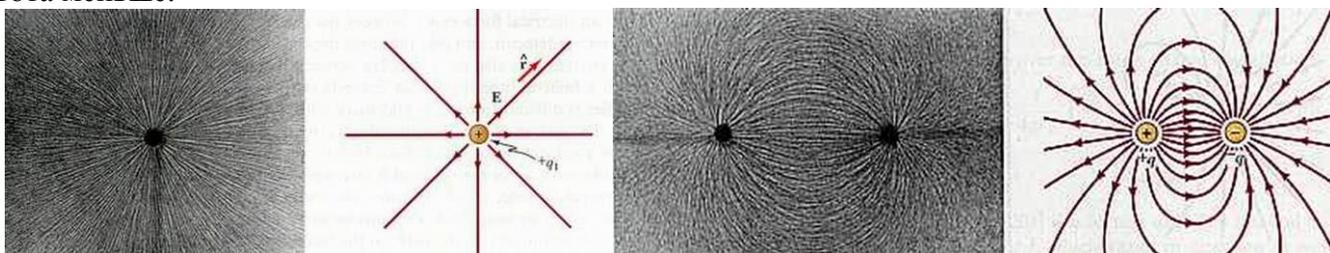
1. силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных,
2. силовые линии нигде не пересекаются и направлены в сторону уменьшения потенциала.
3. силовые линии всегда перпендикулярны к экипотенциалам.



### Графическое изображение распределения потенциала

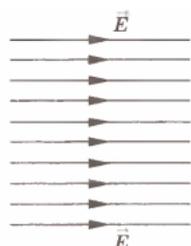
Точечный заряд	Разноименные точечные заряды	Одноименные точечные заряды

Силовые линии строят с определённой густотой, соответствующей модулю напряжённости электрического поля  $E$ . Где поле сильнее, там густота силовых линий больше, в области разряжения густота меньше.



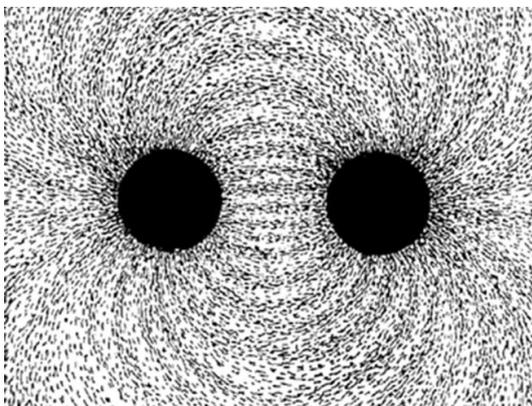
Силовые линии точечного заряда

Силовые линии электрического диполя

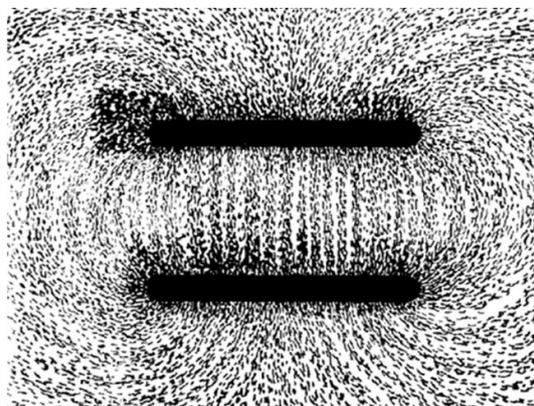


**Однородным** называется электростатическое поле, в каждой точке которого вектор напряжённости  $\vec{E}$  имеет одну и ту же величину и направление.

Графически однородное поле изображается параллельными силовыми линиями, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга.



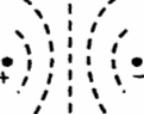
Силловые линии электрического поля между двумя разноимённо заряженными шариками



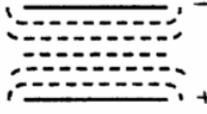
Силловые линии электрического поля между двумя разноимённо заряженными плоскими пластинами



Поле уединённых точечных зарядов



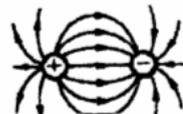
Поле диполя



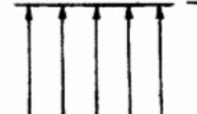
Поле плоского конденсатора



Поле уединённых точечных зарядов



Поле диполя



Поле плоского конденсатора

### Закон Кулона

(позволяет определить силу электростатического взаимодействия двух точечных зарядов)

Установлен Шарлем Огюстеном Кулоном в 1785 году и носит его имя.

#### Закон Кулона:

Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, и направлена по прямой, соединяющей эти заряды:

$$F_{\text{кул}} = k \frac{|q_1| |q_2|}{\epsilon r^2}$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  - коэффициент пропорциональности;

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$  - электрическая постоянная,

$\epsilon = \frac{F_{\text{в вакууме}}}{F_{\text{в веществе}}} = \frac{E_{\text{в вакууме}}}{E_{\text{в веществе}}}$  - диэлектрическая проницаемость среды.

$\epsilon$  (эпсилон) - величина безразмерная

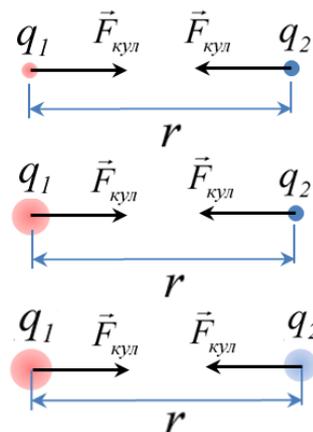
(физический смысл  $\epsilon$ : она показывает, во сколько раз вещество ослабляет внешнее электрическое поле по сравнению с вакуумом).

$q_1$  и  $q_2$  - точечные заряды, Кл - Кулон;  $r$  - расстояние между зарядами, м

Для вакуума и воздуха  $\epsilon = 1$

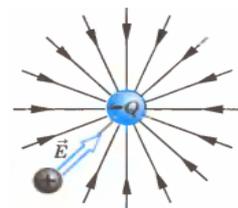
В природе точечных заряженных тел не существует, но если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействия между ними. В таком случае эти тела можно рассматривать, как точечные.

Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между ними. Опыт показывает, что воздух очень мало влияет на силу этого взаимодействия и она оказывается почти такой же, как и в вакууме.



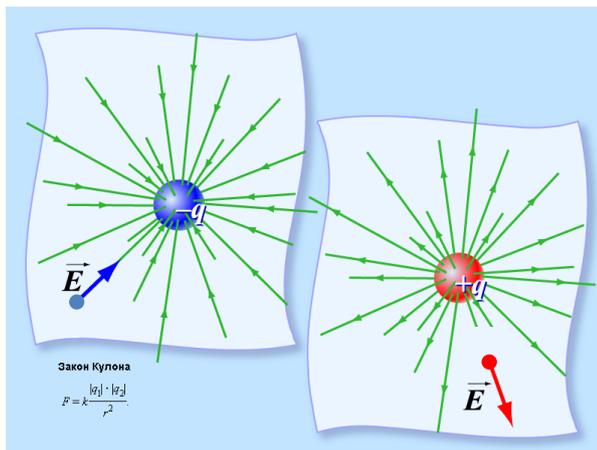
**Напряжённость электрического поля точечного заряда**

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2},$$



где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$ ;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды;  $q$  - точечный заряд, Кл;  
 $r$  - расстояние от заряда до рассматриваемой точки, м



Обратите внимание, что вектор  $\vec{E}$  направлен от положительного заряда к отрицательному.

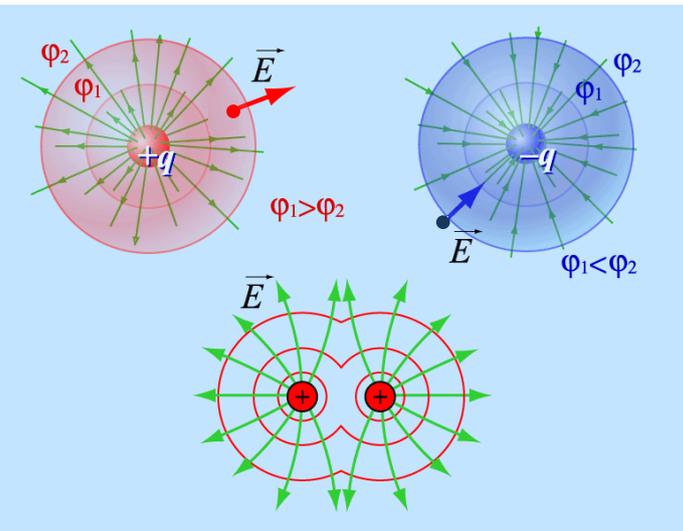
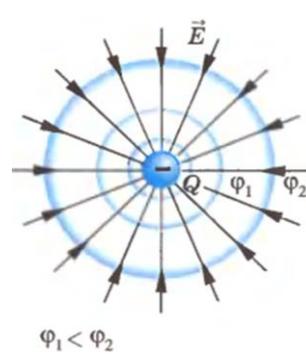
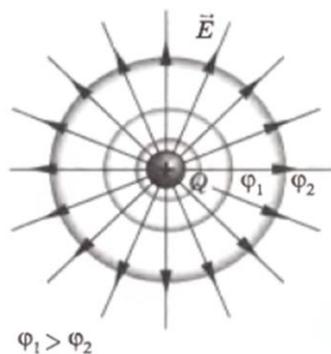
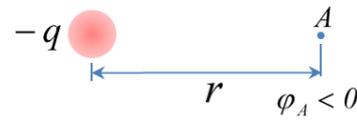
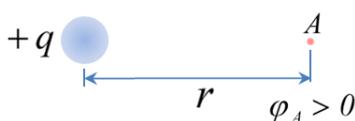
**Потенциал электрического поля точечного заряда**

$$\varphi = k \frac{q}{\epsilon r}$$

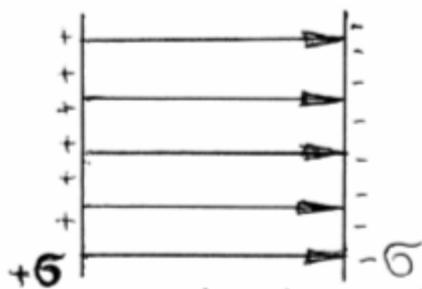
где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$ ;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды;  
 $q$  - точечный заряд, Кл;  
 $r$  - расстояние от заряда до рассматриваемой точки, м

Обратите внимание, что отрицательный заряд создаёт отрицательный потенциал, а положительный заряд создаёт положительный потенциал.



## Напряжённость электростатического поля между двумя равномерно заряженными бесконечными плоскостями (поле плоского конденсатора)



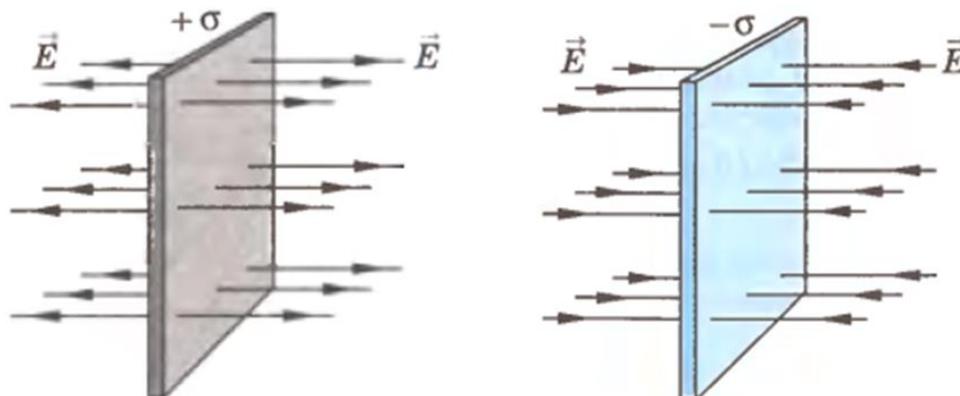
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0},$$

где  $E$  - напряжённость электрического поля,  $\frac{В}{м}$ ;

$\sigma$  - поверхностная плотность электрического заряда;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества между пластинами Конденсатора;

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{м}$  - электрическая постоянная.



**Обратите внимание на то, что:**

- линии напряженности положительно заряженной бесконечной плоскости направлены от неё перпендикулярно её поверхности.
- линии напряженности отрицательно заряженной бесконечной плоскости направлены к ней перпендикулярно её поверхности.
- электростатическое поле бесконечной равномерно заряженной плоскости однородно (то есть напряжённость  $E$  одинакова на любом расстоянии от плоскости) и зависит лишь от поверхностной плотности заряда  $\sigma$ .

### Принцип суперпозиции для электростатического поля

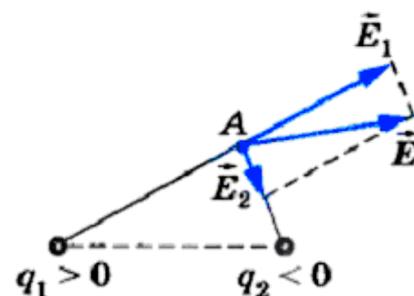
(позволяет рассчитать характеристики электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов)

*Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, то результирующая напряжённость поля в этой точке равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждой из частиц:*

$$\vec{E}_{рез} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum \vec{E}_i$$

*Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, то результирующий потенциал электрического поля системы точечных зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из имеющихся зарядов:*

$$\varphi_{рез} = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \sum \varphi_i$$



### Потенциальная энергия зарядов $W$ в электрическом поле

При перемещении заряда, действующая на него со стороны электрического поля сила, совершает работу. Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает потенциальной энергией.

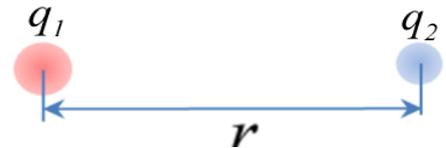
Физический смысл имеет не сама потенциальная энергия, а разность её значений, определяемая работой поля при перемещении заряда из начального положения точечного заряда в его конечное положение.

Точку отсчёта потенциальной энергии электростатического поля можно выбирать произвольно. Однако обычно за начало отсчёта потенциальной энергии выбирается точка на бесконечно большом расстоянии от заряда, так как на таком расстоянии заряды практически не взаимодействуют друг с другом.

### Потенциальная энергия электростатического взаимодействия двух точечных зарядов.

$$W = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ;



$W$  - потенциальная энергия электростатического взаимодействия, Дж;

$q_1$  и  $q_2$  - величина точечных зарядов, Кл;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся заряды;

$r$  - расстояние между точечными зарядами, м.

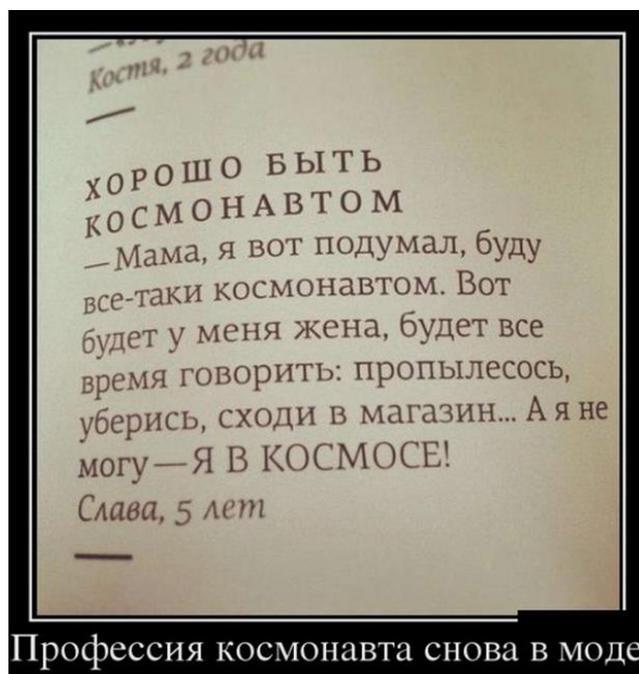
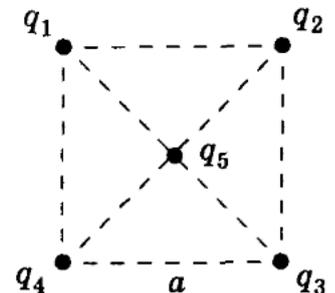
### Потенциальная энергия электростатического взаимодействия системы точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i,$$

где

$W$  - потенциальная энергия электростатического взаимодействия системы точечных зарядов, Дж;

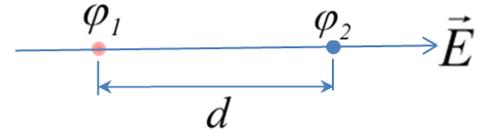
$\varphi_i$  - потенциал электростатического поля в точке пространства, где находится заряд  $q_i$ , созданный всеми зарядами системы, кроме  $q_i$  (определяется по принципу суперпозиции).



Профессия космонавта снова в моде

## Связь между модулем напряжённости однородного электростатического поля и разностью потенциалов

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d},$$



где  $E$  - напряжённость однородного электростатического поля,  $\frac{B}{M}$ ;

$\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов между двумя точками поля,  $B$ ;

$d$  - расстояние между этими точками,  $M$ .

## Связь между напряжённостью $\vec{E}$ и потенциалом $\varphi$

Разность потенциалов между двумя точками поля  $\varphi_2 - \varphi_1$  и напряжённость поля  $\vec{E}$  между этими точками связаны соотношениями:  $\varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$  или  $\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right)$ ,

где  $\frac{\partial\varphi}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial\varphi}{\partial y}$  и  $\frac{\partial\varphi}{\partial z}$  - частные производные потенциала  $\varphi$  электростатического поля по координатам  $x$ ,  $y$  и  $z$ ,

$\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  и  $\vec{k}$  - единичные орты координатных осей.

Выражение в скобках называется **градиентом потенциала** и сокращенно записывается так:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad \text{или} \quad \vec{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

**Градиент функции** - это вектор, который показывает величину пространственного изменения какой-либо функции, и направлен в сторону максимального её возрастания.

Как видно из формулы (4), вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  направлен в сторону, наиболее быстрого уменьшения потенциала  $\varphi$ .

Зная эквипотенциальные поверхности, и используя равенство (4) можно определить направления вектора напряженности  $\vec{E}$  в каждой точке поля.

## Работа сил электростатического поля по перемещению точечного заряда

$$A_{\text{ЭП}} = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$A_{\text{ЭП}} = -(W_2 - W_1),$$

$$A_{\text{ЭП}} = F_{\text{ЭП}} S \cos \alpha,$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - потенциал электрического поля в начальной и конечной точках траектории,  $B$ ,

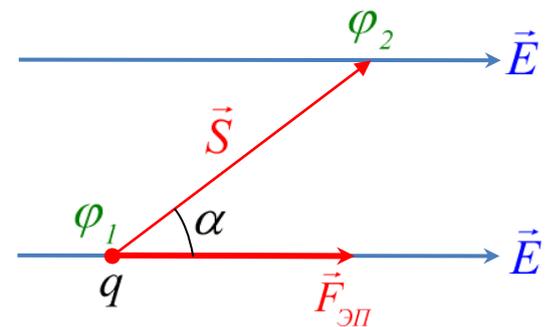
$W_1$  и  $W_2$  - потенциальная энергия заряда в начальной и

конечной точках траектории,  $Дж$ ,

$S$  - перемещение точечного заряда,  $M$ ;

$F_{\text{ЭП}}$  - сила, действующая на заряд со стороны электрического поля,  $H$ ;

$\cos \alpha$  - угол между векторами  $\vec{F}_{\text{ЭП}}$  и  $\vec{S}$ .



Работа сил электростатического поля при перемещении заряженной частицы из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы. Следовательно, сила электростатического поля является консервативной (или потенциальной)

### Поток вектора $\vec{E}$

**Элементарным потоком вектора  $\vec{E}$**  называется скалярная величина  $d\Phi_E$ , равная скалярному произведению вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  на вектор элемента площади поверхности  $d\vec{s}$ :

$$d\Phi_E = \vec{E}d\vec{s} = E ds \cdot \cos \alpha,$$

где  $[\Phi_E] = B \cdot m$ , Вольт-метр;  $\vec{E}$  - напряжённость электрического поля,  $\frac{B}{m}$ ;

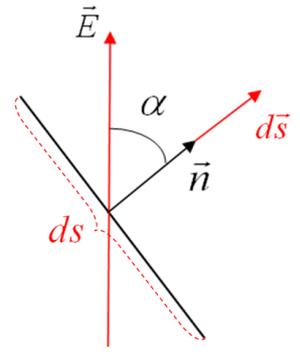
$d\vec{s} = ds \cdot \vec{n}$  - вектор элемента площади поверхности,  $m^2$ ;

$ds$  - элементарная площадь поверхности,  $m^2$ ;

$\vec{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности  $ds$ .

Вектор  $d\vec{s}$  сонаправлен с единичным вектором нормали  $\vec{n}$  к этой поверхности,

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{E}$  и  $d\vec{s}$ .



**Потоком вектора  $\vec{E}$**  через поверхность произвольной формы называется скалярная величина  $\Phi_E$ , равная поверхностному интегралу вида:

$$\Phi_E = \iint_S d\Phi_E = \iint_S \vec{E}d\vec{s} = \iint_S E ds \cdot \cos \alpha = \iint_S E_n ds,$$

где  $E_n = E \cos \alpha$  - проекция вектора  $\vec{E}$  на нормаль  $\vec{n}$  к элементу поверхности  $ds$ .

### Электрическое смещение $\vec{D}$

**Электрическим смещением  $\vec{D}$  (дэ)** в данной точке пространства называется векторная величина, численно равная произведению относительной диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$  и электрической постоянной  $\epsilon_0$  на напряжённость электрического поля  $\vec{E}$  в данной точке.

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}.$$

$[D] = \frac{Kл}{m^2}$ , Кулон на метр квадратный,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{m}$  - электрическая постоянная

### Поток вектора $\vec{D}$

**Элементарным потоком вектора  $\vec{D}$**  называется скалярная величина  $d\Phi_D$ , равная скалярному произведению вектора электрической индукции  $\vec{D}$  на вектор элемента площади поверхности  $d\vec{s}$ :

$$d\Phi_D = \vec{D}d\vec{s} = D ds \cos \alpha,$$

где  $[\Phi_D] = Kл$ , Кулон;

$\vec{D}$  - вектор электрической индукции электрического поля,  $\frac{Kл}{m^2}$ ;

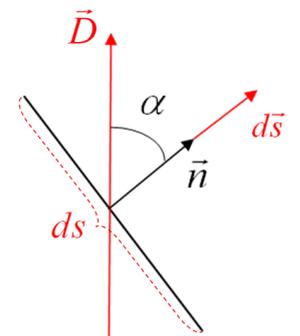
$d\vec{s} = ds \cdot \vec{n}$  - вектор элемента площади поверхности,  $m^2$ ;

$ds$  - элементарная площадь поверхности,  $m^2$ ;

$\vec{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности  $ds$ .

Вектор  $d\vec{s}$  сонаправлен с единичным вектором нормали  $\vec{n}$  этой поверхности и выбирается такой величины, чтобы элемент поверхности был плоским.

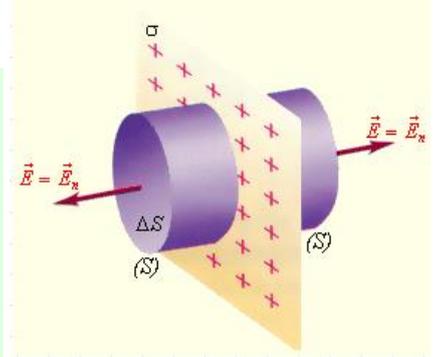
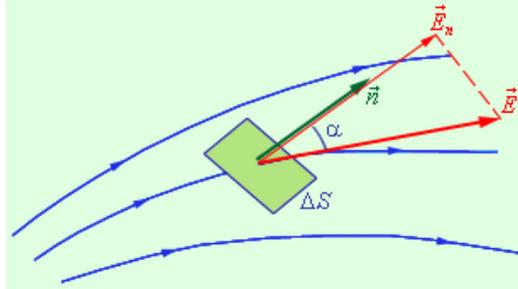
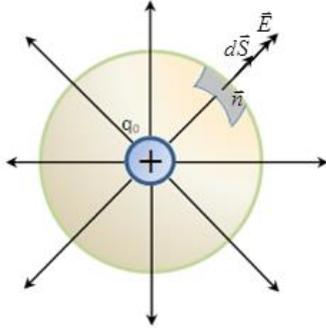
$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{D}$  и  $d\vec{s}$ .



**Потоком вектора**  $\vec{D}$  через поверхность  $S$  произвольной формы называется скалярная величина  $\Phi_D$ , равная поверхностному интегралу вида:

$$\Phi_D = \iint_S d\Phi_D = \iint_S \vec{D} d\vec{s} = \iint_S D ds \cdot \cos \alpha = \iint_S D_n ds,$$

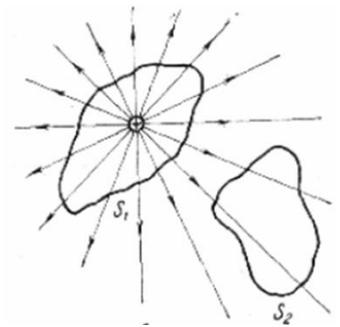
где  $D_n = D \cos \alpha$  - проекция вектора  $\vec{D}$  на нормаль  $\vec{n}$  к элементу поверхности  $ds$ .



### Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

Поток  $\Phi_E$  вектора напряжённости электростатического поля  $\vec{E}$  в вакууме через произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен алгебраической сумме зарядов  $\sum q_i$ , находящихся внутри этой поверхности, делённой на электрическую постоянную  $\epsilon_0$ :

$$\oiint_S \vec{E} d\vec{s} = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}.$$

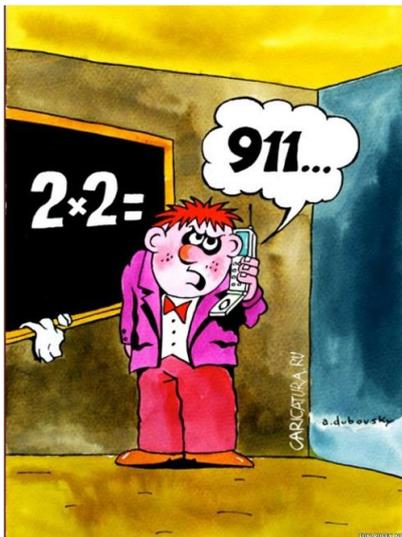


**Физический смысл теоремы Гаусса:** она говорит о том, что источником электростатического поля являются неподвижные электрические заряды.

### Теорема Гаусса для электростатического поля в веществе

Поток  $\Phi_D$  вектора электрического смещения  $\vec{D}$  электростатического поля в диэлектрике через произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен алгебраической сумме свободных зарядов  $\sum q_{своб}$ ,

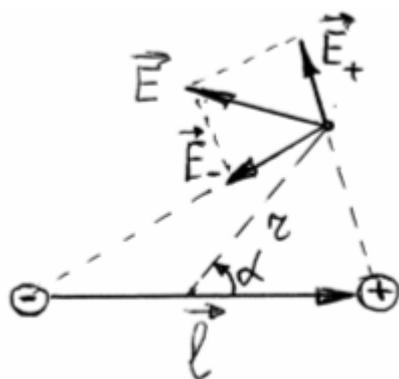
находящихся внутри этой поверхности:

$$\oiint_S \vec{D} d\vec{s} = \sum q_{своб}.$$


Не узнаёшь?



## Электрический диполь



**Электрическим диполем** называется система, состоящая из двух одинаковых по величине разноимённых точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга.

$E = k \frac{P}{\epsilon r^3} \sqrt{3 \cos^2 \alpha + 1}$  - **напряжённость** электрического поля  
точечного диполя

$\varphi = k \frac{P}{\epsilon r^2} \cos \alpha$  - **потенциал** электрического поля  
точечного диполя

где  $P$  - электрический дипольный момент,  $Кл \cdot м$ , Кулон-метр.

$r$  - расстояние от точечного диполя до рассматриваемой точки,  $М$ ,

$\alpha$  - угол между плечом диполя  $\vec{l}$  и радиус-вектором  $\vec{r}$  (см. рис.)

**Плечом диполя**  $\vec{l}$  называется вектор, проведённый от отрицательного заряда диполя к положительному.  $[\vec{l}] = м$ .

В качестве диполя можно рассматривать любую полярную молекулу, например,  $H_2O$ ,  $HCl$  и др.

**Точечным** называется диполь, для которого расстояние  $r$  от рассматриваемой точки до диполя, много больше плеча диполя  $\vec{l}$ .

**Электрическим дипольным моментом**  $\vec{p}$  называется векторная величина, равная произведению положительного заряда диполя  $|q|$  на его плечо  $\vec{l}$ :

$$\vec{p} = |q| \vec{l}.$$

$[\vec{p}] = Кл \cdot м$ , Кулон-метр.



Будущая зарплата хорошего студента

### Ёмкость уединённого проводника

**Уединённым** называется проводник, который так далеко удалён от других проводников, что они не оказывают на него ни какого влияния.

Опыт показывает, что потенциал  $\varphi$  уединённого проводника прямо пропорционален его заряду  $q$ .

**Электрической ёмкостью (электроёмкостью) уединённого проводника  $C$**  называется скалярная физическая величина, равная отношению заряда проводника  $q$  к его потенциалу  $\varphi$ :

$$C = \frac{q}{\varphi},$$

где  $C$  - ёмкость проводника,  $[C] = \Phi$  - Фарад,  $q$  - заряд проводника, Кл,  $\varphi$  - потенциал проводника, В

### Ёмкость уединённой сферы (или шара)

Электроёмкость уединённой сферы зависит от её радиуса:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R,$$

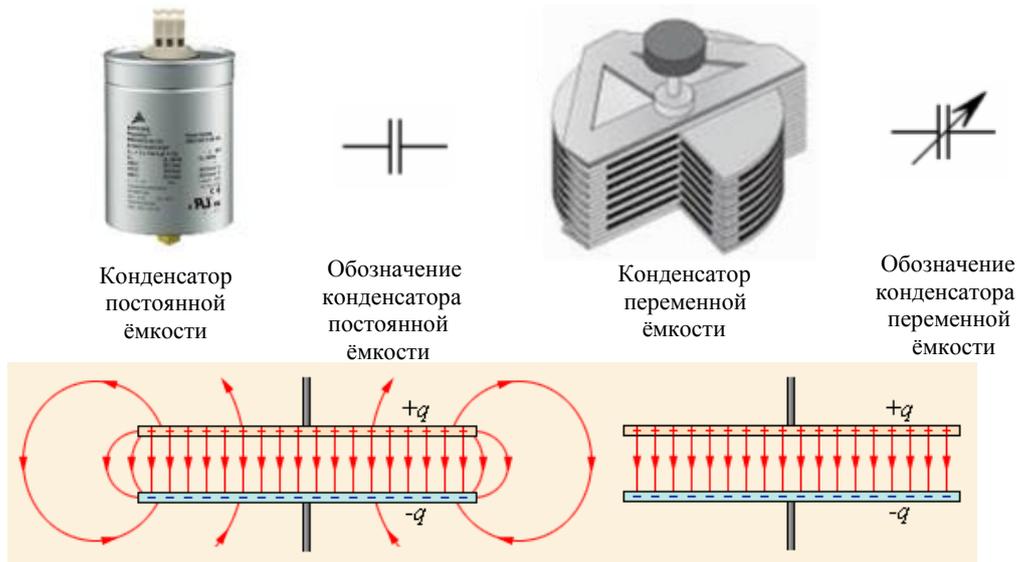
где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится сфера или шар,

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} - \text{электрическая постоянная, } R - \text{радиус сферы или шара, м.}$$

Ёмкость в один фарад  $1 \Phi$  очень большая величина. Поэтому на практике пользуются кратными единицами электрической ёмкости:  $1 \text{пФ}$  (пикофарад) =  $10^{-12} \Phi$  и  $1 \text{мкФ}$  (микрофарад) =  $10^{-6} \Phi$ .

### Конденсаторы

**Конденсатором** называется устройство для накопления электрического заряда.



Конденсатор постоянной ёмкости

Обозначение конденсатора постоянной ёмкости

Конденсатор переменной ёмкости

Обозначение конденсатора переменной ёмкости

Конденсаторы используются в различных радиоэлектронных устройствах. Они используются для сглаживания пульсаций в выпрямителях переменного тока, для разделения постоянной и переменной составляющей тока, в электрических колебательных контурах радиопередатчиков и радиоприёмников, для накопления больших запасов электрической энергии при проведении физических экспериментов в области лазерной техники и управляемого термоядерного синтеза.

**Ёмкостью** (или **электроёмкостью**) **конденсатора  $C$**  (цэ) называется скалярная величина, равная отношению заряда положительной обкладки конденсатора к разности потенциалов между положительной и отрицательной обкладками:

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

где  $q$  - заряд положительной обкладки конденсатора, Кл,

$U = \varphi_1 - \varphi_2$  - напряжение на конденсаторе, В.



Обозначение конденсатора на схеме

### Зависимость ёмкости плоского конденсатора от его геометрических размеров

Плоский конденсатор представляет собой две плоские параллельные металлические пластинки, разделённые между собой слоем диэлектрика.

Электрическая ёмкость плоского конденсатора: 
$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  – площадь одной пластины (обкладки) конденсатора,  $\text{м}^2$ ,

$d$  – расстояние между пластинами конденсатора,  $\text{м}$

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора.

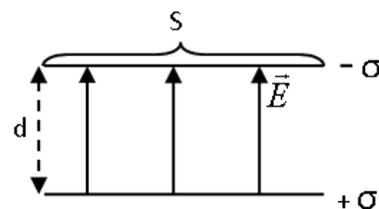
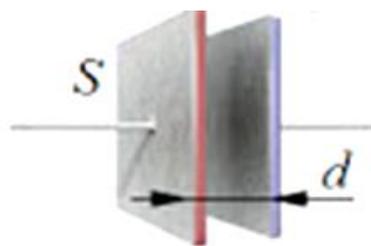
$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  – электрическая постоянная.

Из анализа формулы следует, что ёмкость конденсатора можно увеличить:

- уменьшая расстояние между пластинами,
- увеличивая площадь пластин,
- повышая  $\varepsilon$  диэлектрика между пластинами.

Ёмкость конденсатора не зависит от:

- заряда на пластинах конденсатора,
- разности потенциалов между пластинами конденсатора,
- внешнего электростатического поля, которое не проникает во внутрь конденсатора.



#### Особенность электрического поля плоского конденсатора

- электрическое поле внутри плоского конденсатора однородно (краевыми эффектами обычно пренебрегают),
- напряжённость поля внутри плоского конденсатора можно определить по

формуле: 
$$E = \frac{U}{d},$$

где  $U$  – напряжение на конденсаторе,  $\text{В}$

$d$  – расстояние между пластинами конденсатора,  $\text{м}$ .



Поле плоского конденсатора

Вне пластин плоского конденсатора электрическое поле отсутствует, так как электрические поля обеих пластин конденсатора компенсируют друг друга (согласно принципу суперпозиции).

### Зависимость ёмкости сферического конденсатора от его геометрических размеров

Сферический конденсатор представляет собой две концентрические сферы (то есть с общим центром), разделённые между собой слоем диэлектрика.

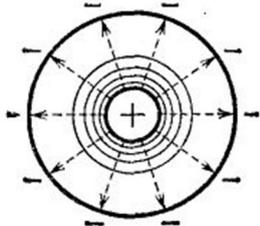
Электрическая ёмкость сферического конденсатора: 
$$C = 4\pi \frac{\varepsilon\varepsilon_0 R_2 R_1}{R_2 - R_1},$$

где  $R_2$  – радиус его внешней обкладки,  $\text{м}$ ;

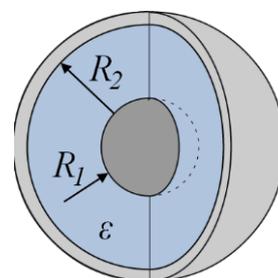
$R_1$  – радиус его внутренней обкладки,  $\text{м}$ .

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора;

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  – электрическая постоянная.



Электрическое поле внутри сферического конденсатора неоднородное

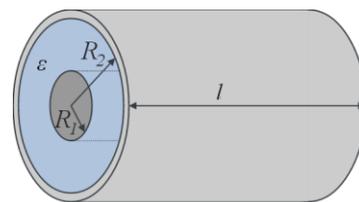


### Зависимость ёмкости цилиндрического конденсатора от его геометрических размеров

Цилиндрический конденсатор представляет собой два коаксиальных цилиндра (то есть с общей осью), разделённых между собой слоем диэлектрика.

Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора:

$$C = 2\pi \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$



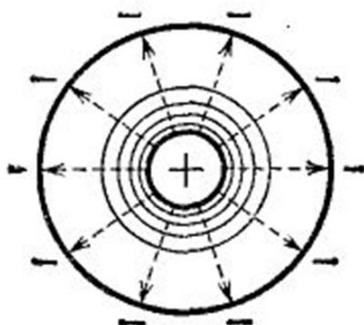
где  $l$  - длина обкладок конденсатора,  $М$ ;

$R_2$  - радиус его внешней обкладки,  $М$ ;

$R_1$  - радиус его внутренней обкладки,  $М$ .

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора;

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{М}$  - электрическая постоянная;



Электрическое поле внутри цилиндрического конденсатора неоднородное

### Энергия электрического поля уединённого проводника

Вокруг любого заряженного проводника возникает электрическое поле, энергию которого можно определить по формулам:

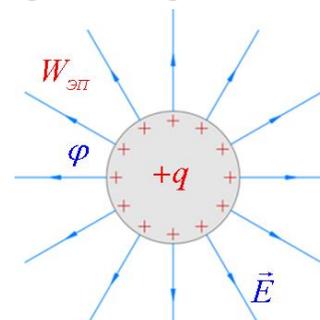
$$W_{\text{эл}} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

где  $W_{\text{эл}}$  - энергия электрического поля проводника,  $Дж$ ;

$C$  - ёмкость проводника,  $\Phi$ ;

$q$  - заряд проводника,  $Кл$ ;

$\varphi$  - потенциал проводника,  $В$ .



### Энергия электрического поля конденсатора

Во время зарядки конденсатора между его пластинами возникает электрическое поле, энергию которого можно определить по формулам:

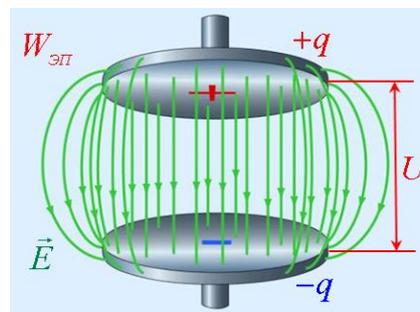
$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

где  $W_{\text{эл}}$  - энергия электрического поля конденсатора,  $Дж$ ;

$C$  - ёмкость конденсатора,  $\Phi$ ;

$q$  - заряд конденсатора,  $Кл$ ;

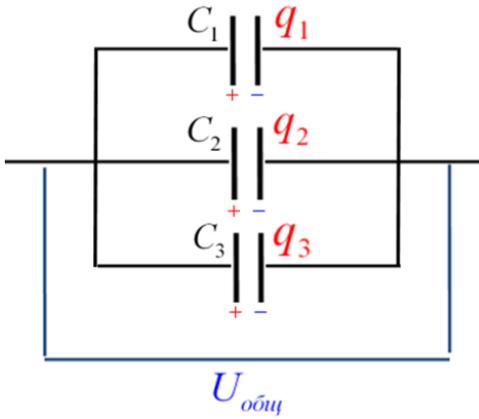
$U$  - напряжение на конденсаторе,  $В$ .



Сообщение в газетах: "...Сегодня в Китае открыта самая большая в мире электростанция. Тысячи маленьких китайцев в шелковых штанишках съезжают по стеклянному желобу."

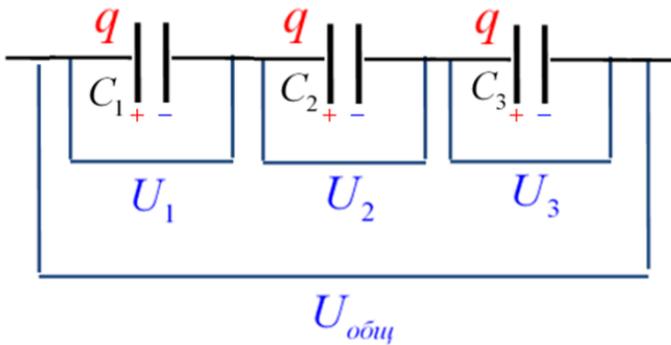
## Виды соединения конденсаторов

### Параллельное соединение конденсаторов



$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \\ U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + \dots + q_n \\ C_i = \frac{q_i}{U_i} \quad C_{\text{общ}} = \frac{q_{\text{общ}}}{U_{\text{общ}}} \end{array} \right.$$

### Последовательное соединение конденсаторов



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \\ U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ q_{\text{общ}} = q_1 = q_2 = \dots = q_n \\ C_i = \frac{q_i}{U_i} \quad C_{\text{общ}} = \frac{q_{\text{общ}}}{U_{\text{общ}}} \end{array} \right.$$

Иногда при решении задач на соединение конденсаторов не удаётся свести схему к их последовательному или параллельному соединению. Тогда необходимо находить параметры каждого конденсатора из следующих соображений:

1. суммарный заряд обкладок конденсаторов, соединённых в общий узел, равен нулю,
2. сумма напряжений по любому замкнутому контуру равна нулю.



Сделай из себя умного человека! Трудись как пчёлка

## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

При решении задач с применением конденсаторов следует обратить внимание на следующие моменты:

- Если конденсатор или система конденсаторов подключена к источнику тока, то напряжение на конденсаторе не изменяется и равно ЭДС источника тока.
- Если конденсатор или система конденсаторов отключена от источника тока, то заряд на конденсаторе или на системе конденсаторов по закону сохранения электрического заряда не изменяется.
- Электроёмкость конденсатора зависит только от его формы и геометрических размеров и не зависит от заряда и напряжения на нём.
- Следует помнить, что внутри электрически заряженного проводника и полости внутри этого проводника напряжённость электростатического поля равна нулю, и что заряд этого проводника расположен на его поверхности, а любая точка проводника (в его внутренней части или на поверхности проводника) имеет один и тот же потенциал.

Что изучает физика?

Знаете, как говорится в народе?

Физика царица всех наук о природе!

Физика много разделов включает,

Каждый вопросы свои изучает.

Например, проводов всех величество

Изучает раздел ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

МЕХАНИКА все изучает движения,

Действия сил, точки их приложения,

Тепловых процессов динамику

Изучает ТЕРМОДИНАМИКА.

Отражение света, его преломление,

Прямолинейное распространение,

Как изображение глаз получает

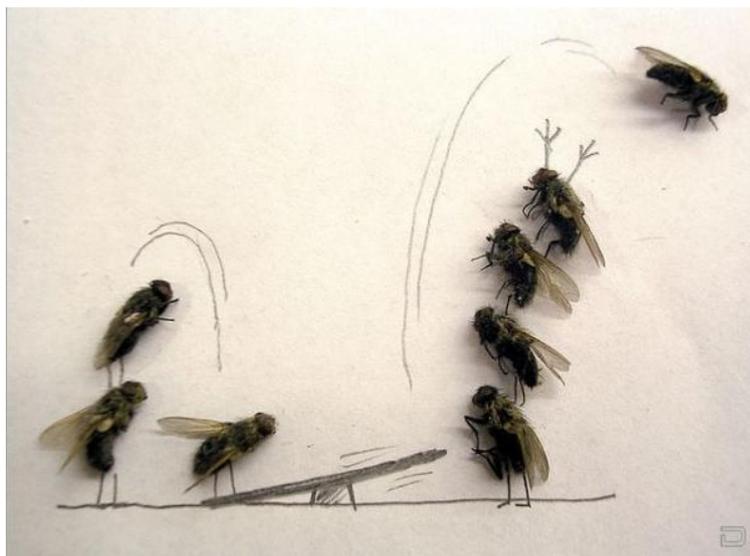
Все это ОПТИКА изучает.

Что собой представляет ядро или атом

Мы из АТОМНОЙ ФИЗИКИ узнаем когда-то.

В каждом разделе много полезного,

Познавательного и интересного!



**Идет экзамен. Преподаватель:**

- Вопрос на пять. Чем измеряется напряжение?

- Вопрос на четыре. Чем измеряется напряжение? А - вольтметром, Б - амперметром, В - омметром.

- Вопрос на три. А не вольтметром ли измеряется напряжение?

## Проводники в электростатическом поле

**Проводниками** называются вещества, которые при обычных условиях хорошо проводят электрический ток.

(это объясняется наличием в веществе большого количества *свободных электрически зарядов*)

**Свободными зарядами** называются заряженные частицы, способные свободно перемещаться в веществе под действием электрического поля.

**Пример проводников:** металлы, электролиты, ионизированные газы.

Носителями свободных зарядов в **металлах** являются электроны. Их концентрация велика – порядка  $10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

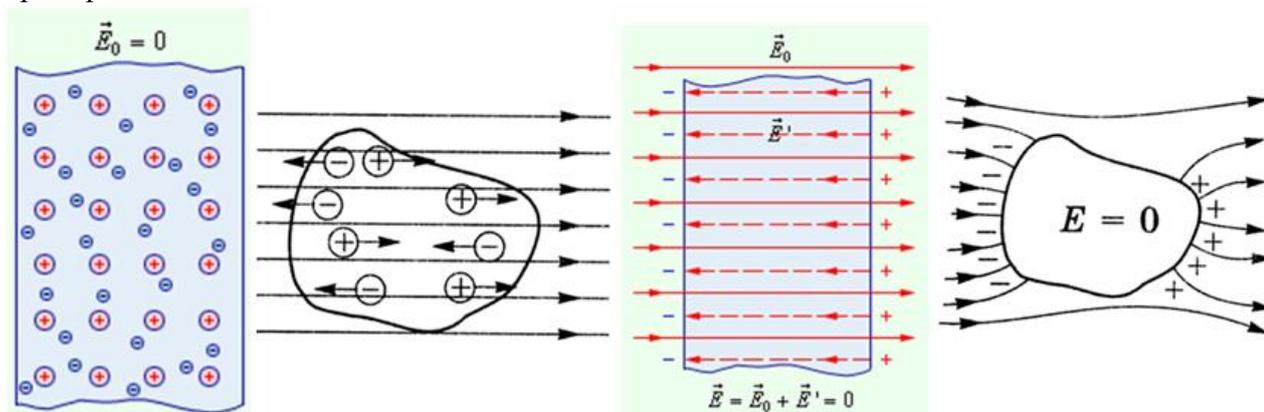
Эти электроны участвуют в беспорядочном тепловом движении. Под действием электрического поля они дополнительно начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью порядка  $10^{-4} \text{ м/с}$ .

В **электролитах** носителями тока являются положительно и отрицательно заряженные ионы, а в **ионизированных газах** – свободные электроны, а так же положительно и отрицательно заряженные ионы.

При внесении металлического проводника в электростатическое поле, свободные электроны проводника смещаются вдоль силовых линий и располагаются на его поверхности.

На одной стороне проводника окажется недостаток электронов и она зарядится положительно, на другой стороне избыток электронов и она зарядится отрицательно.

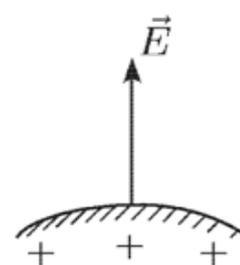
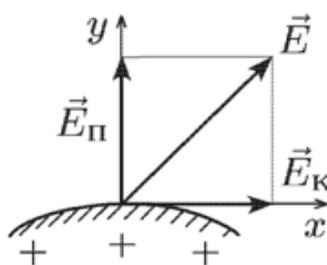
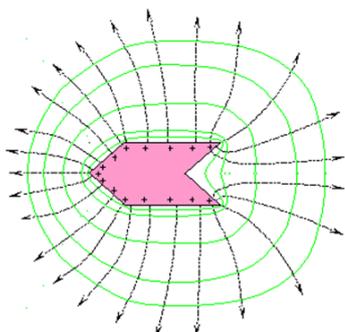
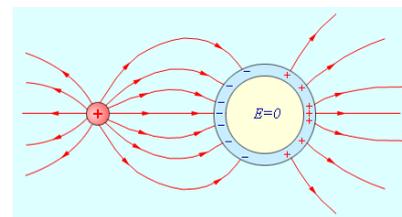
Заряды внутри проводника создают своё электрическое поле, направленное навстречу внешнему. Накопление свободных электронов на одном из концов проводника будет происходить до тех пор, пока внутреннее электрическое поле не скомпенсирует внешнее, в результате чего напряжённость результирующего поля станет равной нулю (то есть при равновесии зарядов на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет. Это приводит к тому, что весь проводник (и поверхность и его внутренняя область) приобретает один и тот же потенциал).



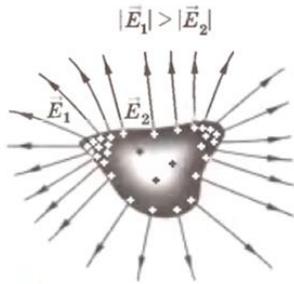
Таким образом:

1. при равновесии заряда на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет и весь проводник (поверхность и его внутреннее пространство) приобретает один и тот же потенциал;

2. при равновесии зарядов на проводнике силовые линии электростатического поля перпендикулярны поверхности проводника (иначе касательная составляющая вектора  $E$  приводила бы свободные заряды в движение и равновесия не было бы);

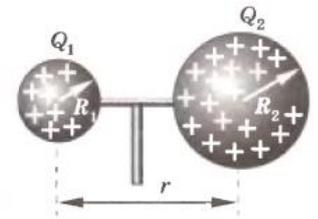
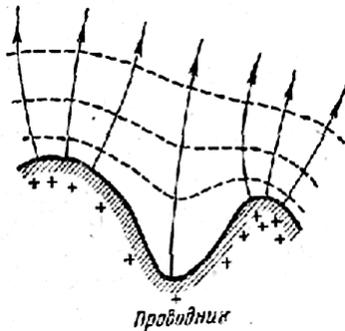


3. заряд на поверхности проводника распределяется неравномерно. Поверхностная плотность заряда зависит от кривизны поверхности: там, где кривизна поверхности меньше, там выше поверхностная плотность заряда, и наоборот (то есть на острие самая большая плотность заряда);



▲ 297

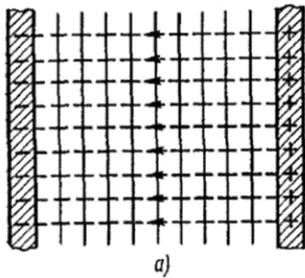
Напряженность поля, созданная заряженным проводником, наибольшая вблизи области с малым радиусом кривизны



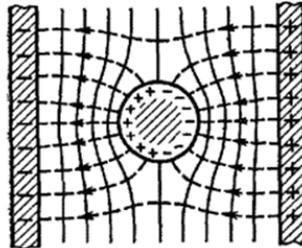
▲ 296

Заряд на сферах перераспределяется пропорционально радиусу сфер

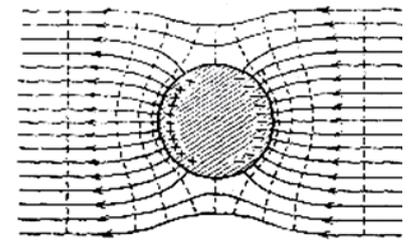
4. благодаря электростатической индукции проводник в электростатическом поле становится подобным диполю, поэтому в пространстве вокруг проводника образуется электрическое поле подобное полю диполя. Это поле деформирует внешнее электрическое поле (см. рис);



а)



б)



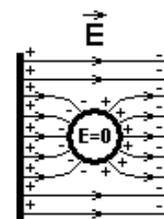
5. у самой поверхности проводника напряжённость поля можно найти по формуле:  $E = \frac{|\sigma|}{\epsilon\epsilon_0}$ ,

где  $\sigma$  - поверхностная плотность электрического заряда в данной точке проводника,

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества вокруг проводника,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная.

Таким образом, при равновесии заряда на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет, то есть внешнее электростатическое поле **внутри проводника не проникает**.

Это используется при экранировании от электростатических полей и называется **электростатической защитой**.



Электростатическая защита.

Электростатическое поле не проникает внутрь проводника

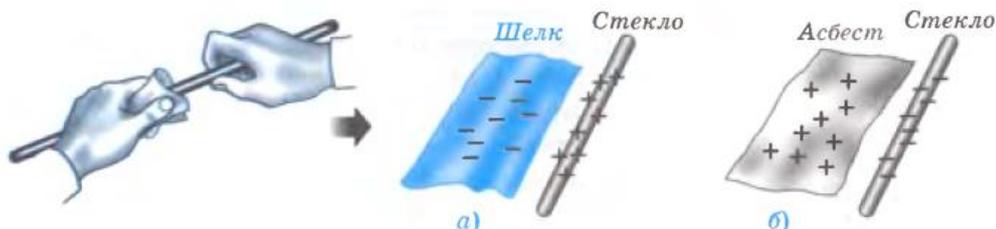


### Диэлектрики в электростатическом поле

**Диэлектриками** называются вещества, которые при обычных условиях не проводят электрический ток (это объясняется отсутствием в веществе свободных носителей тока).

**Пример диэлектриков:** стекло, пластмассы, резина и т.д.

При трении двух незаряженных диэлектриков друг о друга их можно наэлектризовать (то есть сообщить каждому электрический заряд). Это происходит из-за того, что при трении электроны одного диэлектрика могут перейти на другой в результате чего, первый диэлектрик всегда заряжается положительно (так как у него оказывается недостаток электронов), а другой отрицательно (так как у него оказывается избыток электронов). В зависимости от материала соприкасающихся тел, один и тот же диэлектрик может приобретать разные по знаку заряды (см. рис)



### Вектор поляризации диэлектрика

Независимо от вида поляризации у любого поляризованного диэлектрика появляется в электрическом поле отличный от нуля суммарный электрический дипольный момент.

Тепловое движение молекул препятствует упорядоченной ориентации всех диполей. Только при температуре абсолютного нуля все диполи выстроились бы вдоль силовых линий поля. Таким образом, под влиянием поля происходит лишь частичная ориентация электрических диполей. Это означает, что в среднем число диполей, ориентированных вдоль поля, больше, чем число диполей, ориентированных против поля.

При внесении диэлектрика во внешнее магнитное поле он поляризуется, то есть приобретает отличный от нуля дипольный момент

$$\vec{p}_V = \sum \vec{p}_i,$$

где  $\vec{p}_i$  - дипольный момент  $i$ -ой молекулы.

**Поляризованность диэлектрика**  $\vec{P}$  называется векторная физическая величина численно равная суммарному электрическому (дипольному) моменту всех молекул заключенных в единице объема:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}, \quad [P] = \frac{Кл}{м^2}.$$

Наблюдения показывают, что для большинства диэлектриков (кроме сегнетоэлектриков) поляризованность  $P$  линейно зависит от напряжённости электрического поля, то есть

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

где  $\varkappa$  (каппа) - **диэлектрическая восприимчивость вещества**, безразмерная,

$E$  - напряжённость электрического поля внутри диэлектрика.

Величина  $\varkappa$  всегда больше единицы.

### Виды диэлектриков

Различают четыре основных вида диэлектриков: неполярные, полярные, ионные и сегнетоэлектрики.

1. **Неполярными** называются диэлектрики, дипольный момент которых в отсутствии внешнего магнитного поля равен нулю.

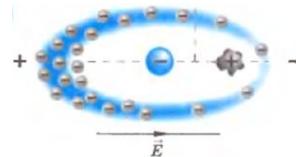
К ним относятся диэлектрики, молекулы которых имеют симметричное строение ( $H_2$ ;  $O_2$ ;  $CO_2$  и др.), в результате чего центр тяжести связанных положительных и отрицательных зарядов молекулы совпадают, поэтому их дипольный момент в отсутствии внешнего электрического поля оказывается равным нулю. Такие молекулы не создают вокруг себя электрическое поле.



Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков не зависит от температуры диэлектрика (при постоянстве концентрации молекул).

2. **Полярными** называются диэлектрики, дипольный момент которых в отсутствие внешнего магнитного поля не равен нулю.

К ним относятся диэлектрики, молекулы которых имеют несимметричное строение ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$  и др.), в результате чего центр тяжести связанных положительных и отрицательных зарядов молекулы не совпадают, поэтому их дипольный момент оказывается отличным от нуля. Такие молекулы даже в отсутствие внешнего электрического поля создают вокруг себя электрическое поле, то есть ведут себя подобно диполям.



Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков уменьшается с увеличением температуры диэлектрика.

3. **Ионными** называются кристаллические диэлектрики, которые представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов противоположных знаков.

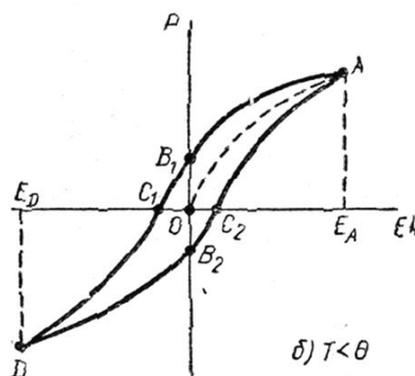
В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы. Их можно рассматривать как систему вставленных одна в другую ионные подрешетки.

(пример ионных диэлектриков:  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $KBr$  и др.)

4. **Сегнетоэлектриками** называются полярные диэлектрики, которые в определенном интервале температур спонтанно поляризованы, то есть обладают поляризованностью  $P$  даже при отсутствии внешнего электрического поля.

На границах интервала температур сегнетоэлектрик в результате фазового перехода превращается в полярный диэлектрик.

Сегнетоэлектрики характеризуются чрезвычайно большим значением диэлектрической проницаемости, порядка  $10^4$  (в то время как диэлектрическая проницаемость, например, дистиллированной воды равна  $81$ ). Величина поляризованности  $P$  нелинейно и неоднозначно зависит от напряженности электрического поля  $E$ .



Сегнетоэлектрики способны проявлять свойство *диэлектрического гистерезиса*, то есть их поляризованность  $P$  определяется не только величиной напряженности  $E$  поля в данный момент времени, но и зависит от предыстории образца.

Свое название сегнетоэлектрики получили от *сегнетовой соли* ( $NaKC_4H_4O_6 \times 4H_2O$ ), на которой впервые были обнаружены описанные выше свойства.

В настоящее время известно более ста чистых сегнетоэлектриков. Среди них наиболее известным является *титанат бария* ( $BaTiO_3$ ).

Если изначально сегнетоэлектрик не был поляризован, то по мере роста напряженности внешнего поля, в которое он помещается, вектор поляризации  $P$  увеличивается, что описывается основной кривой поляризации (участок  $OA$ , на рис). В достаточно сильных полях процесс поляризации достигает насыщения ( $P=const$ ). Если теперь начинать уменьшать напряженность поля, то поляризация начнет убывать, но зависимость  $P=f(E)$  теперь будет описываться участком кривой  $AB$ . В результате при  $E=0$  сегнетоэлектрик будет обладать некоторой остаточной поляризацией  $P_{ост} \neq 0$ . Чтобы полностью деполяризовать сегнетоэлектрик, необходимо, изменив направление внешнего поля, увеличивать его напряженность до некоторой величины  $E_c$  (участок  $BC$  кривой поляризации). Величина  $E_c$  называется *коэрцитивной силой*. Если продолжать увеличивать напряженность поля в направлении обратном к первоначальному, то сегнетоэлектрик вновь начнет поляризоваться до насыщения, но уже в обратном направлении (участок  $CD$ ). Дальнейший ход кривой симметричен первоначальному участку  $ACD$ . Таким образом, график зависимости поляризованности от напряженности внешнего поля имеет вид петли, которую называют *петлей гистерезиса*.

Спонтанная поляризация является источником очень больших электрических полей. Вокруг макроскопического объема сегнетоэлектрика, поляризованного спонтанно в некотором направлении, возникает электрическое поле большой энергии. Такое состояние энергетически невыгодно.

Система стремится перейти в такое состояние, чтобы, с одной стороны, существовала спонтанная поляризация, а с другой стороны, энергия была бы минимальной.

Это может осуществляться в результате разделения объёма сегнетоэлектрика на малые области, в каждой из которых имеется спонтанная поляризация в некотором определенном направлении, различным для различных областей.

При этом средняя поляризованность всего объёма сегнетоэлектрика равна нулю, поэтому напряженность внешнего электрического поля, порождаемого этим объемом, близка к нулю. Малые области со спонтанной поляризацией называются *диэлектрическими доменами* или просто *доменами*. Таким образом, неполяризованный сегнетоэлектрик является совокупностью доменов с беспорядочно ориентированными спонтанными поляризованностями. Энергетически выгодно уменьшение объемов доменов, но этому процессу препятствует фактор, связанный с наличием поверхностной энергии на границе между соседними доменами. С уменьшением объемов доменов увеличивается суммарная поверхность границ, что ведет к увеличению поверхностной энергии, поэтому объёмы доменов могут уменьшаться лишь до определенных пределов порядка тысяч межмолекулярных расстояний.

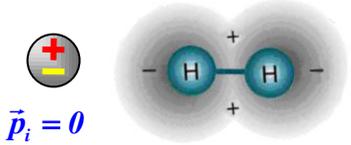
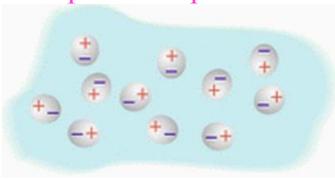
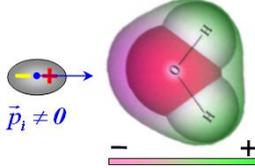
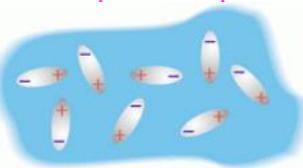
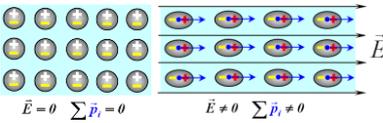
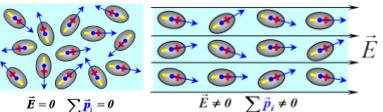
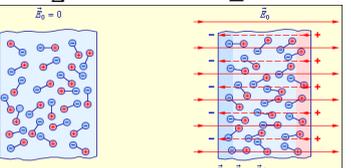
Процесс изменения поляризованности сегнетоэлектрика во внешнем электрическом поле состоит в переориентации дипольных моментов отдельных доменов в изменении объёмов и движении границ между доменами.



Гимнастика для ума

Расшифруй и напиши имена детей.

<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Неполярные	Полярные	Ионные	Сегнетоэлектрики
<p>К неполярным диэлектрикам относятся вещества, молекулы которых в отсутствии внешнего электрического поля имеют равный нулю дипольный момент.</p> <p>Модель неполярной молекулы водорода</p>  <p>Такие молекулы имеют симметричное строение</p>  <p>Газы: Жидкости: Твёрдые тела:</p>	<p>К полярным диэлектрикам относятся вещества, атомы, молекулы или ионы которых имеют собственные электрические моменты даже при отсутствии внешнего электрического поля</p> <p>Модель полярной молекулы воды</p>  <p>Такие молекулы имеют несимметричное строение.</p>  <p>газы: жидкости: твёрдые тела:</p>	<p>Ионные кристаллы, представляющие собой пространственные решётки с правильным чередованием ионов противоположных знаков, которые можно рассматривать как систему вставленных друг в друга ионных подрешёток.</p> <p>Твёрдые тела:</p>	<p>К сегнетоэлектрикам относятся вещества, атомы, молекулы или ионы которых имеют собственные дипольные моменты даже при отсутствии внешнего электрического поля и которые при не слишком высоких температурах обладают самопроизвольной (то есть спонтанной) поляризованностью, сильно изменяющейся под влиянием внешних воздействий (электрического поля, деформации, температуры)</p> <p>Твёрдые тела:</p>
<p>При внесении неполярного диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит деформация электронных облаков его атомов, что приводит к возникновению электрических дипольных моментов у его атомов, направленных всегда по направлению внешнего поля. (деформационная поляризация)</p> <p>В результате этого собственное электрическое поле внутри неполярного диэлектрика оказывается направленным против внешнего поля, поэтому, согласно принципу суперпозиции, результирующее электрическое поле внутри неполярного диэлектрика слегка уменьшается.</p> 	<p>При внесении полярного диэлектрика во внешнее электрическое поле дипольные моменты атомов начинают ориентироваться преимущественно по направлению внешнего поля, хотя тепловое движение атомов этому препятствует. (ориентационная поляризация)</p> <p>В результате этого собственное электрическое поле внутри полярного диэлектрика оказывается направленным против внешнего поля, поэтому, согласно принципу суперпозиции, результирующее электрическое поле внутри полярного диэлектрика слегка уменьшается.</p>  	<p>Ионные диэлектрики во внешнем электростатическом поле поляризуются по направлению вектора E этого поля, в результате чего электрическое поле внутри ионного диэлектрика слегка уменьшается.</p>	<p>Твёрдые вещества, которые во внешнем электростатическом поле поляризуются по направлению вектора E этого поля, в результате чего электрическое поле внутри сегнетоэлектрика сильно увеличивается.</p> <p><b>Свойства сегнетоэлектриков</b> объясняется тем, что при температурах ниже, так называемой, температуры Кюри, весь сегнетоэлектрик разбит на маленькие области – <b>домены</b> размерами <math>10^{-6}</math> м, которые самопроизвольно поляризованы до насыщения</p> 

## Поляризация диэлектриков

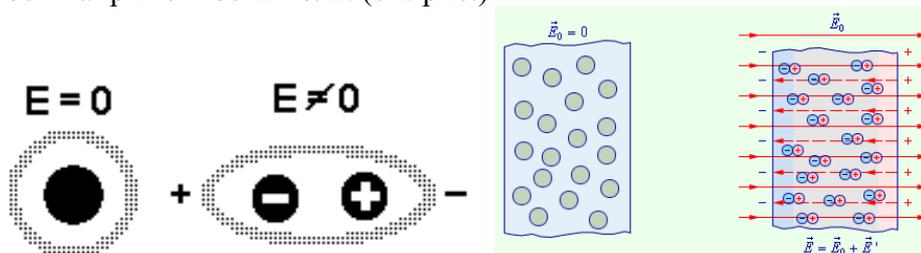
При внесении всех видов диэлектриков во внешнее электростатическое поле происходит их *поляризация*.

**Поляризацией диэлектрика** называется процесс ориентации диполей полярных диэлектриков или появления под действием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей неполярных диэлектриков.

Различают следующие виды поляризации:

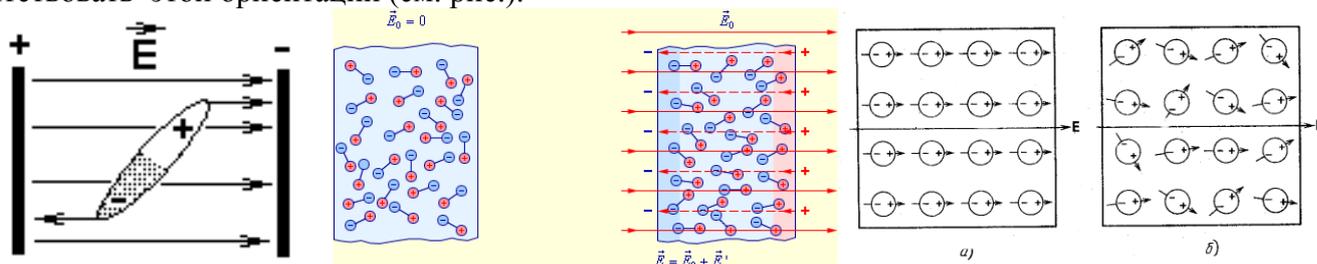
1. **электронная** (или **деформационная**) поляризация диэлектрика с неполярными молекулами.

При внесении неполярного диэлектрика во внешнее электростатическое поле, происходит деформация электронных оболочек атомов вдоль внешнего поля, в результате чего они приобретают отличный от нуля дипольный момент. В неполярных диэлектриках электростатическое поле сначала поляризует молекулы, растягивая в разные стороны положительные и отрицательные заряды, а затем поворачивает их вдоль оси напряженности поля. (см. рис.)



2. **ориентационная** (или **дипольная**) поляризация диэлектрика с полярными молекулами.

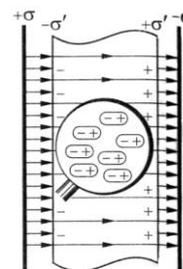
При внесении полярного диэлектрика во внешнее электростатическое поле, происходит ориентация дипольных моментов молекул вдоль внешнего поля, однако тепловое движение молекул пытается препятствовать этой ориентации (см. рис.).



Эта ориентация тем сильнее, чем больше напряжённость электрического поля и меньше температура диэлектрика.

3. **ионная** поляризация диэлектрика с ионными кристаллическими решётками.

Заключается в смещении подрешёток положительных ионов вдоль поля, а подрешёток отрицательных ионов против поля, приводящем к возникновению дипольных моментов.



## Перекуси, ты заслужил



### Напряжённость электрического поля внутри диэлектрика

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, в результате чего на его противоположных сторонах возникают не скомпенсированные заряды, которые образовались не в результате перемещения свободных зарядов (так как таковых в диэлектрике нет), а за счёт связанных с атомами диэлектрика валентных электронов.

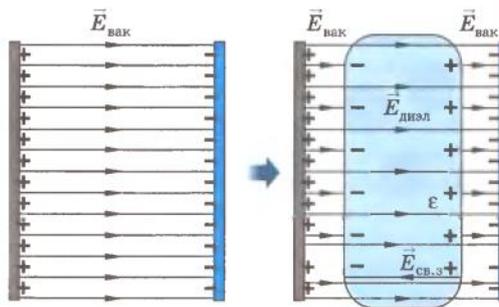
Эти возникшие на поверхности диэлектрика заряды так и называются **связанными**.

**Связанными зарядами** называются разноименные заряды, входящие в состав атомов (или молекул), которые не могут свободно перемещаться по веществу под действием электрического поля.

Эти заряды создают внутри диэлектрика свое электрическое поле, которое всегда оказывается направленным против внешнего поля, поэтому результирующее поле внутри диэлектрика, согласно принципу суперпозиции, уменьшается.

292

Электростатическое поле в диэлектрике. Поле связанных зарядов, направленное противоположно напряженности внешнего электростатического поля, уменьшает напряженность в  $\epsilon$  раз



В диэлектрике напряженность суммарного поля связанных зарядов направлена противоположно напряженности внешнего поля. Вследствие этого поле в диэлектрике ослабляется. Степень ослабления зависит от свойств диэлектрика.

Ослабление поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом характеризует *относительная диэлектрическая проницаемость вещества*.

**Относительная диэлектрическая проницаемость вещества** – это число, показывающее во сколько раз модуль напряженности электростатического поля в вакууме  $E_{в \text{ вакууме}}$  больше, чем напряженность поля в однородном диэлектрике  $E_{в \text{ веществе}}$ :

$$\epsilon = \frac{E_{в \text{ вакууме}}}{E_{в \text{ веществе}}}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает так же, во сколько раз сила взаимодействия между заряженными частицами в вакууме больше, чем в данной среде:

$$\epsilon = \frac{F_{в \text{ вакууме}}}{F_{в \text{ веществе}}}$$

Только неграмотный человек на вопрос: «Как найти площадь Ленина?» – отвечает: «Длину Ленина умножить на ширину Ленина». А грамотный знает, что надо взять интеграл по поверхности!





## ПОСТОЯННЫЙ ТОК

**Электрическим током** называется упорядоченное движение заряженных частиц или заряженных макроскопических тел.

- в металлах свободные электроны,
- в электролитах положительные и отрицательные ионы,
- в ионизированных газах положительные и отрицательные ионы, а так же свободные электроны

Движение частиц в проводнике непосредственно не видно. О наличии электрического тока судят по тем действиям и явлениям, которые его сопровождают:

- *тепловое* – нагревание проводника, по которому течет ток;
- *химическое* - электрический ток может изменять химический состав проводника, например выделять его составные химические части;
- *магнитное* - силовое воздействие на соседние токи и на намагниченные тела.

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо:

- наличие свободных заряженных частиц.
- сила, действующая на них в определенном направлении



Ток тебе не игрушка

**Постоянным** называется ток, величина и направление которого не изменяются с течением времени.

### Основные характеристики тока

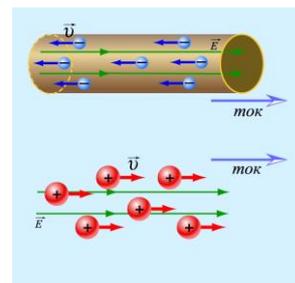
1. **Силой тока** называется скалярная величина, равная отношению заряда  $dq$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за время  $dt$  к этому промежутку времени.)

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$I$  – сила тока,  $[I] = A$  - Ампер,

$dq$  - заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время  $dt$ , Кл.

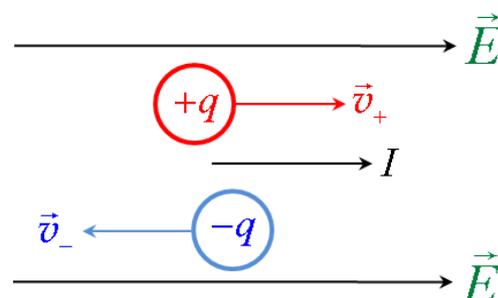
За направление тока приняли движение положительных зарядов, образующих этот ток.



В случае постоянного тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

За направление тока приняли направление движения положительных зарядов, образующих этот ток.



2. **Плотностью тока**  $\vec{j}$  (йот) называется векторная величина, совпадающая по направлению с электрическим током в данной точке и равная отношению силы тока  $I$ , проходящего через площадь  $S_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению тока, к величине этой площади.)

$$j = \frac{I}{S_{\perp}} = |q| n v_{др},$$

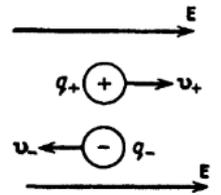
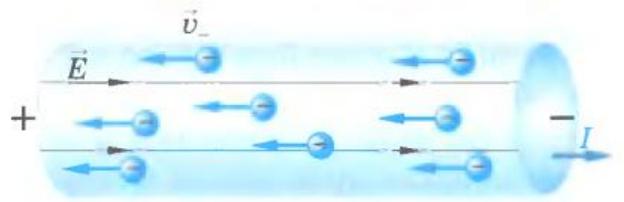
где  $j$  - плотность тока,

$$[j] = \frac{A}{M^2} - \text{Ампер на метр квадратный,}$$

$S_{\perp}$  - площадь поперечного сечения проводника,  $M^2$ ,

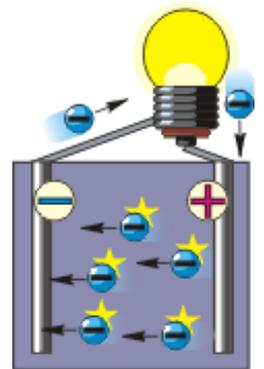
$|q|$  - модуль заряда носителей тока, Кл;  $n$  - концентрация носителей тока,  $\frac{1}{M^3}$ ;

$v_{др}$  - дрейфовая скорость носителей тока,  $\frac{M}{c}$ .



### Электродвижущая сила (ЭДС) $\mathcal{E}$

Для поддержания тока в цепи необходим источник тока, внутри которого на носители тока действуют силы не электрической природы, называемые **сторонними силами**. Под действием сторонних сил заряды внутри источника тока движутся против сил электрического поля, благодаря чему на концах проводника поддерживается разность потенциалов и в цепи течёт ток. Таким образом, сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Величиной этой работы удобно характеризовать сторонние силы.



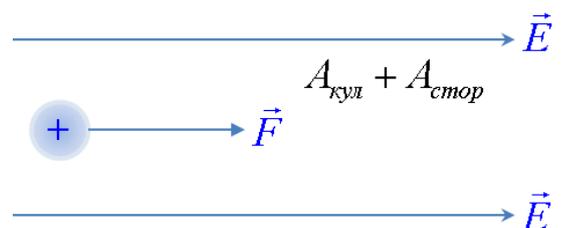
**Электродвижущей силой (ЭДС)  $\mathcal{E}$**  на участке цепи 1-2 называется величина, определяемая работой сторонних сил  $A_{\text{сторонних}}$  по перемещению единичного положительного заряда  $q$  на этом участке цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{сторонних}}}{q}, \quad [\mathcal{E}] = B, \text{ Вольт.}$$

**Напряжением  $U$  на участке цепи** 1-2 называется величина, равная отношению работы, совершаемой суммарным полем кулоновских  $A_{\text{кулоновских}}$  и сторонних  $A_{\text{сторонних}}$  сил по перемещению единичного положительного заряда  $q$  на данном участке цепи, к величине этого заряда:

$$U = \frac{A_{\text{сторонних}} + A_{\text{кулоновских}}}{q},$$

$$[U] = B, \text{ Вольт}$$



На практике напряжение  $U$  на участке цепи 1-2 определяют по формуле:

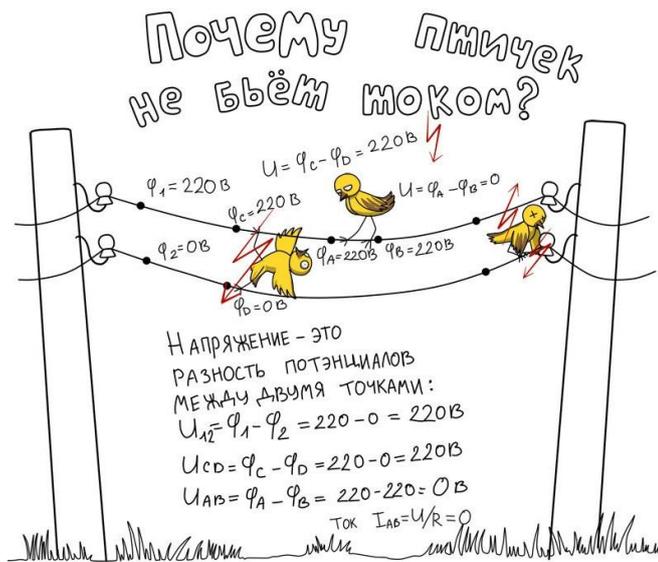
$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{1-2}.$$

Если на участке 1-2 ЭДС нет, то напряжение на этом участке равно разности потенциалов на концах этого участка:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - это потенциал в начале и конце участка электрической цепи, В,

$\mathcal{E}_{1-2}$  - суммарная ЭДС на этом участке цепи, В.



**Идет экзамен. Преподаватель поясняет:**

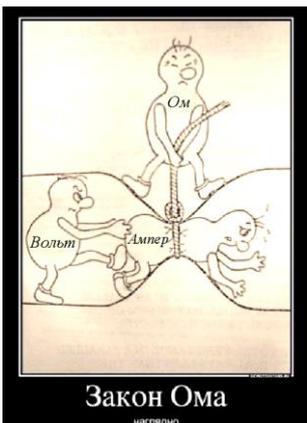
- Вопрос на пять. Чем измеряется напряжение?
- Вопрос на четыре. Чем измеряется напряжение? А - вольтметром, Б - амперметром, В - омметром.
- Вопрос на три. А не вольтметром ли измеряется напряжение?



Студенческая смекалка

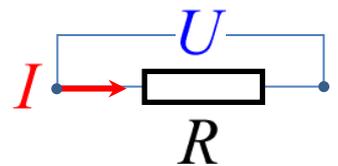


Окно юного физика

**Закон Ома для участка электрической цепи**

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

где  $I$  (и) - сила тока,  $[I] = A$ , Ампер;  
 $U$  (у) - напряжение на участке цепи,  $B$ , Вольт;  
 $R$  (эр) - сопротивление участка цепи,  $Om$ .

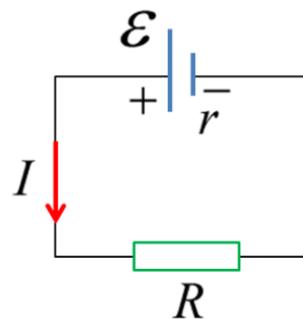


## Закон Ома для замкнутой электрической цепи



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

где  $\mathcal{E}$  (е) – ЭДС (электродвижущая сила) источника тока, В, Вольт;  
 $R$  (эр)- внешнее сопротивление цепи, Ом;  
 $r$  (эр) - внутреннее сопротивление цепи (сопротивление источника тока), Ом.



(ток во внешней цепи течёт от положительного полюса источника тока к отрицательному полюсу (см. рис.))



## Закон Ома

Мне знаком один закон,  
его придумал Георг Ом:  
Чтоб силу тока получить  
надо  $U$  на  $R$  делить.

## Закон Ома

Кто закон не знает Ома?  
С ним, конечно, все знакомы.  
Быстро с нами повтори:  
 $U$  равняется  $R \cdot I$ .



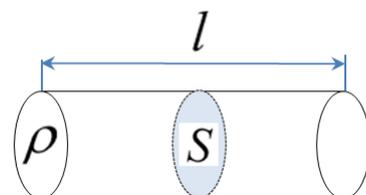
Студент сдает экзамен по физике. Ничего не знает.

- По билету что-нибудь знаешь?
- Нет.
- Хорошо, напиши закон Ома.
- Не знаю.
- Что же мне с тобой делать... Ладно, давай рисовать. Рисуи поезд. Так, а где все провода?.. Хорошо. Колес что-то маловато. Рисуи колеса... Молодец! Поезд у тебя странный без окон и без дверей. Рисуи окна и двери... Прекрасно. А почему в твоём поезде людей нет? Рисуи людей. Так, чтобы в окнах были видны люди... Теперь смотри, видишь этого человека?
- Даа...
- Это ты. В армию едешь!!!

## Зависимость сопротивления проводника от его геометрических размеров

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

где  $R$  (эр) - сопротивление участка цепи, Ом;  
 $\rho$  (ро)- удельное сопротивление проводника, Ом · м;  
 $l$  (эль) - длина проводника, м;  
 $S$  (эс) - площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.



Я бы сдался без сопротивления

Ничего для нас нет проще, чем делить длину  $l$  на площадь  $S$ .  
 Может нам деление дать сопротивление  $R$ .  
 Не учли мы здесь пока материал проводника,  
 А учесть его мы можем, если всё на « $\rho$ » умножим:

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

**Работа постоянного тока на участке электрической цепи.**

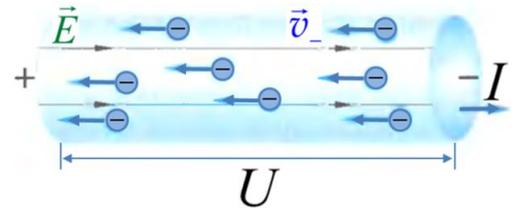
$$A = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$$

где  $A$  - работа тока, Дж;

$U$  - напряжение на данном участке цепи, В;

$q$  - заряд, прошедший по данному участку цепи за время  $t$ , Кл;

$I$  - сила тока, А;  $t$  - время протекания тока на данном участке цепи, с.

**Мощность постоянного тока на участке цепи**

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

где  $P$  (пэ) - мощность тока, Вт, Ватт;

$A$  - работа тока на данном участке цепи, Дж;

$t$  - время совершения работы, с;

$U$  (у) - напряжение на данном участке цепи, В;

$I$  (и) - сила тока на участке цепи, А.

**Закон Джоуля – Ленца**

(позволяет определить количество теплоты, которое выделяется в проводнике при прохождении по нему электрического тока)

$$Q = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$$

где  $Q$  (ку) - количество теплоты, выделившейся на участке цепи, Дж;

$I$  - сила тока, А;

$R$  - сопротивление участка цепи, Ом;

$t$  - время протекания тока на данном участке цепи, с.



**Полезная работа источника тока**

$$A_{\text{полезная}} = qU_{\text{ист}} = IU_{\text{ист}}t$$

где  $q$  - заряд, прошедший через источник тока, Кл;

$U_{\text{ист}} = \mathcal{E} - Ir = IR$  - напряжение на клеммах (или полюсах) источника тока, оно же равно падению напряжения во всей внешней цепи, В;

$\mathcal{E}$  - ЭДС источника тока, В;

$I$  - сила тока, текущего через источник тока, (она равна силе тока в неразветвлённом участке цепи), А;

$R$  - сопротивление участка цепи, Ом.

**Затраченная (или полная) работа источника тока**

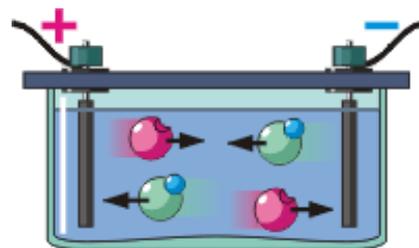
$$A_{\text{затраченная}} = q\mathcal{E} = I\mathcal{E}t$$

где  $A_{\text{затраченная}}$  - затраченная работа источника тока, Дж;

$q$  - заряд, прошедший через источник тока, Кл;

$I$  - сила тока, текущего через источник тока, А;

$\mathcal{E}$  - ЭДС источника тока, В.

**Затраченная (или полная) мощность источника тока**

$$P_{\text{затраченная}} = \frac{A_{\text{затраченная}}}{t} = I\mathcal{E}$$

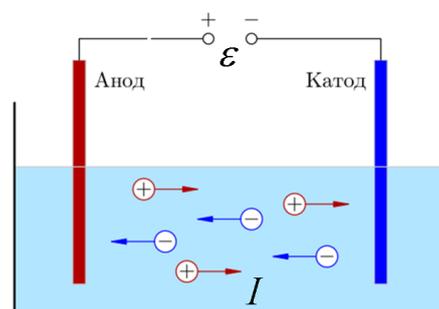
где  $P_{\text{затраченная}}$  - затраченная мощность источника тока, Вт;

$A_{\text{затраченная}}$  - затраченная работа источника тока, Дж;

$t$  - время прохождения тока через источник, с;

$I$  - сила тока, текущего через источник тока, А;

$\mathcal{E}$  - ЭДС источника тока, В.

**Полезная мощность источника тока**

$$P_{\text{полезная}} = \frac{A_{\text{полезная}}}{t} = IU_{\text{ист}}$$

где  $P_{\text{полезная}}$  - полезная мощность источника тока, Вт;

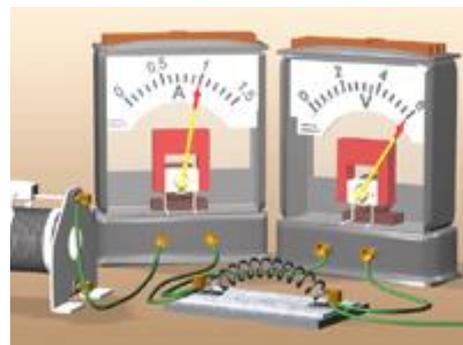
$A_{\text{полезная}}$  - полезная работа источника тока, Дж;

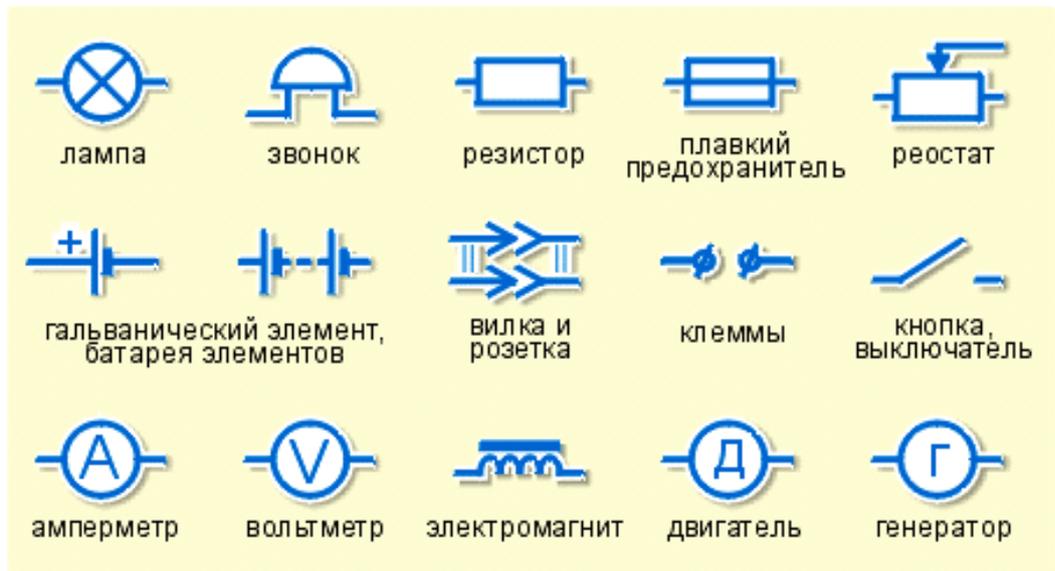
$t$  - время прохождения тока через источник, с;

$I$  - сила тока, текущего через источник тока, А;

$U_{\text{ист}} = \mathcal{E} - Ir = IR$  - напряжение на клеммах (или полюсах)

источника тока, оно же равно падению напряжения во всей внешней цепи, В.





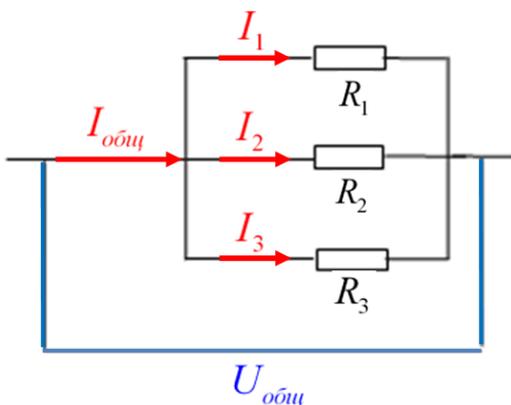
### КПД источника тока

**КПД источника тока**  $\eta$  (эта) называется скалярная величина, равная отношению полезной работы источника тока  $A_{\text{полезная}}$  к его затраченной работе  $A_{\text{затраченная}}$ :

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{затраченная}}} = \frac{P_{\text{полезная}}}{P_{\text{затраченная}}}$$

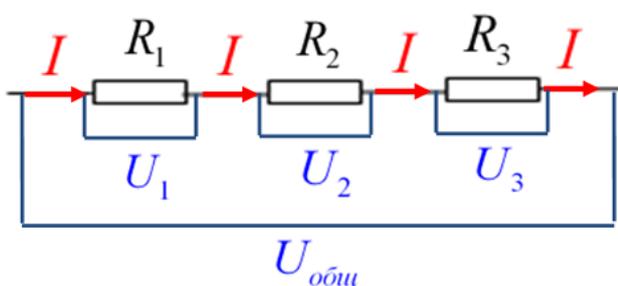
### Виды соединения сопротивлений

#### Параллельное соединение



$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \\ U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{array} \right.$$

#### Последовательное соединение



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \\ U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \\ I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{array} \right.$$



*Параллельное соединение проводников*

---

Построил прапорщик роту и спрашивает:  
 « Кто может починить рацию на бронетранспортёре?»  
 Один очкарик из строя: «А она на лампах или на полупроводниках?»  
 Прапорщик: « Для особо тупых повторяю, рация НА БРОНЕТРАНСПОРТЁРЕ!!!!»



Ну, что ты, не грусти! Всё будет хорошо!!!



Стипендия российского студента

## Правила Кирхгофа для цепей постоянного тока

### Первое правило Кирхгофа

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю, то есть 
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

### Второе правило Кирхгофа

В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивление  $R$  соответствующих участков цепи этого контура, равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k$$

#### Применяя законы Кирхгофа необходимо:

1. Определить число электрических узлов и независимых контуров в схеме

**Узлом** называется место соединения трех и более проводников.

**Контур** – это любая замкнутая цепь.

**Независимый контур** – это контур, который содержит хотя бы одну новую ветвь, не входящую в уже использованные контура.

**Ветвь** – участок цепи от узла до узла.

2. Перед составлением уравнений произвольно выбрать и указать стрелками на чертеже:

а) направление токов (если они не задана по условию задачи) во всех сопротивлениях, входящих в цепь, учитывая, что от узла до узла течёт один и тот же ток;

б) направление обхода контура.

3. При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа считать токи, подходящие к узлу, положительными, а токи, отходящие от узла - отрицательными.

*Число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов, содержащихся в цепи.*

4. При составлении уравнений по второму правилу Кирхгофа следует считать:

а) падение напряжения на участке цепи (т.е. произведение  $I_i R_i$ ) входит в уравнение со знаком плюс, если направление тока в данном участке совпадает с выбранным направлением обхода контура; в противном случае произведение  $I_i R_i$  входит в уравнение со знаком минус;

б) ЭДС  $\mathcal{E}$  входит в уравнение со знаком плюс, если оно повышает потенциал в направлении обхода контура: т.е. если при обходе контура внутри источника тока приходится идти от минуса к плюсу, в противном случае ЭДС  $\mathcal{E}$  входит в уравнение со знаком минус.

*Число независимых уравнений, которые могут быть составлены по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров, имеющих в цепи.*

Для составления уравнений первый контур можно выбрать произвольно. Все следующие контуры следует выбирать таким образом, чтобы в каждый новый контур входила хотя бы одна ветвь цепи, не участвовавшая ни в одном из ранее использованных контуров. Произвольно выбранное направление обхода по контурам не изменяется до конца решения задачи.

Если при решении уравнений, составленных вышеуказанным способом, получены отрицательные значения силы тока или напряжения, то это означает, что ток через данное сопротивление в действительности течет в направлении, противоположном выбранному.




---

В учебных заведениях идет экзамен по электротехнике.

**В университете** вопрос в билете: "В чем измеряется сила тока?" Три варианта ответа:

- |               |                   |                 |
|---------------|-------------------|-----------------|
| 1. в амперах; | 2. в килограммах; | 3. в децибелах. |
|---------------|-------------------|-----------------|

**В институте:** "Сила тока измеряется в амперах?"

Три варианта ответа:

- |        |         |                           |
|--------|---------|---------------------------|
| 1. да; | 2. нет; | 3. затрудняюсь ответить." |
|--------|---------|---------------------------|

**В военном училище:** "Сила тока измеряется в амперах!"

Три варианта ответа:

- |               |               |                  |
|---------------|---------------|------------------|
| 1. Так точно; | 2. Никак нет. | 3. Не могу знать |
|---------------|---------------|------------------|

**МОЗГОломка №2 «Туристы»**

**Глядя на рисунок, ответь на следующие вопросы:**

1. Сколько туристов живет в этом лагере?
2. Когда они сюда приехали: сегодня или несколько дней назад?
3. На чем они сюда приехали?
4. Далеко ли от лагеря до ближайшего селения?
5. Откуда дует ветер: с севера или юга?
6. Какое сейчас время дня?
7. Куда ушел Шура?
8. Кто был вчера дежурным? (Назовите по имени.)
9. Какое сегодня число какого месяца?

**Ответы на МОЗГОломку №2 «Туристы» ищи на следующих страницах.**

**Красота природы**

## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Нарисуйте электрическую схему согласно условию задачи.
2. Определите, какие проводники соединены последовательно, а какие параллельно (при необходимости нарисуйте эквивалентную схему, при этом помните, что в электрической цепи точки с одинаковым потенциалом можно как соединять, так и разъединять без нарушения работы цепи, так как режим тока при этом не нарушится (ток между точками с одинаковым потенциалом не течёт)).
3. По необходимости запишите закон Ома для различных участков цепи и используйте формулы последовательного и параллельного соединения проводников. Силу тока в неразветвлённом участке цепи можно определить по закону Ома для замкнутой цепи.

- Если соединение проводников смешанное, то его надо разложить на участки последовательного и параллельного соединений и, поочерёдно применяя формулы для этих соединений, найти сопротивление всей цепи.

- Если такое разложение выполнить не удаётся, то это соединение проводников необходимо заменить на эквивалентное. Эта замена основана на возможности соединять или разъединять точки цепи, имеющие одинаковый потенциал, при этом работа электрической цепи не изменяется, так как ток между точками с одинаковым потенциалом не течёт.

Найти такие точки можно из соображений симметрии. Если вход и выход схемы лежат на оси симметрии, то в цепи будет симметричное распределение токов, и любые точки цепи, симметричные относительно оси, будут иметь одинаковый потенциал.

Если в задаче идёт речь о показаниях вольтметра и амперметра, то надо помнить, что

- вольтметр включается в цепь параллельно участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение, и показывает значение напряжения на вольтметре и данном участке цепи;
- амперметр включается в цепь последовательно участку цепи, на котором необходимо измерить силу тока, и показывает значение силы тока на амперметре и данном участке цепи.

Если в задаче говорится о том, что количество теплоты, выделившееся с нагревателя при прохождении по нему тока, превращается в другие виды энергии (в основном выделяется в виде тепла), то применяют уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{отданное}} = Q_{\text{полученное}},$$

где  $Q_{\text{отданное}}$  - количество теплоты, отданное нагревателем,

$Q_{\text{полученное}}$  - количество теплоты, полученное другими телами системы.

Если на нагревание тел системы расходуется только часть  $\eta$  выделившегося нагревателем тепла, то уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$\eta Q_{\text{отданное}} = Q_{\text{полученное}},$$

где  $\eta$  (эта) - коэффициент полезного действия этого теплового процесса.

### Вступительная лекция в техническом ВУЗе.

Профессор говорит:

— Для начала я вам объясню, кто такой инженер.

Итак, представьте себе завод, куда каждый день привозят машину спирта для технических нужд. Стоит огромный бак, который полностью заполняется спиртом. Около бака всегда дежурит учётчица, которая выдает спирт строго по накладной. Вечером остатки спирта в баке учётчица сливает и уходит.

Ставлю вопрос: «как слив весь спирт из бака, после ухода учётчицы, принести домой немного спирта на день рождение?»

Обалдевшие студенты начинают выдвигать версии, но ничего не придумывают.

Наконец, профессор объясняет:

— А теперь ответ. Инженер поступит следующим образом:

он поставит в бак ведро. Когда утром зальют в бак спирт, ведро наполнится. А после того, как спирт из бака сольют, ведро останется полным. Теперь надо только вытащить его из бака.

А теперь будем учиться на инженеров.

## МАГНЕТИЗМ

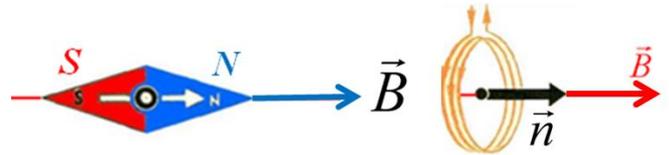
**Магнитным полем** называется особый вид материи, не воспринимаемый органами чувств человека и оказывающий силовое воздействие на магниты, проводники и контуры с током, а так же на движущиеся заряженные частицы и тела.

### Основные характеристики магнитного поля

#### Вектор магнитной индукции $\vec{B}$

Основной силовой характеристикой, характеризующей магнитное поле в данной точке пространства, является **вектор магнитной индукции  $\vec{B}$** .

**Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$**  – это векторная физическая величина, направление которой в данной точке поля совпадает с направлением, которое указывает в этой точке северный полюс магнитной стрелки или положительная нормаль к контуру с током.



Есть три основных способа определения величины вектора магнитной индукции в данной точке поля, которые основаны на силовом воздействии магнитного поля на контур с током, проводник с током или движущийся заряд:

**Магнитной индукцией  $\vec{B}$**  в данной точке магнитного поля называется физическая величина, численно равная отношению максимального вращающего момента сил, действующего в данной точке поля на контур с током, к произведению силы тока  $I$  в нём и площади поверхности данного контура:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m} = \frac{M_{\max}}{IS},$$

где  $M_{\max}$  - максимальный вращающий момент сил, действующий на контур с током в данной точке магнитного поля,

$p_m = IS$  - магнитный момент контура с током,  $I$  - сила тока в контуре,  $S$  - площадь контура, **или**

**магнитной индукцией  $\vec{B}$**  в данной точке магнитного поля называется физическая величина, равная отношению максимальной силы  $F_{\max}$ , действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный проводник с током, к произведению силы тока  $I$  в нём на длину данного

проводника  $l$  :

$$B = \frac{F_{\max}}{Il},$$

где  $F_{\max}$  - максимальная сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током,

$I$  - сила тока в проводнике,  $l$  - длина прямолинейного проводника, **или**

**магнитной индукцией  $\vec{B}$**  в данной точке магнитного поля называется физическая величина, равная отношению максимальной силы  $F_{\max}$ , действующей со стороны магнитного поля на движущийся точечный заряд, к произведению величины этого заряда на его скорость:

$$B = \frac{F_{\max}}{|q|v},$$

где  $F_{\max}$  - максимальная сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд,

$|q|$  - модуль заряда,  $v$  - скорость заряда.

Измеряется магнитная индукция в Теслах:  $[B] = Tл$ , Тесла.

Таким образом, магнитная индукция в 1 Тл означает, например, что в однородном магнитном поле, на участок проводника длиной в 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила 1 Н.

(аналогичные определения можно дать для действия магнитного поля на контур с током и движущийся заряд)

### Вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ (аш)

Использовать вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  не всегда удобно, поскольку его величина зависит от свойств среды. Поэтому вводится вспомогательная характеристика магнитного поля, величина которой от свойств среды не зависит. Эту величину назвали **вектором напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$** .

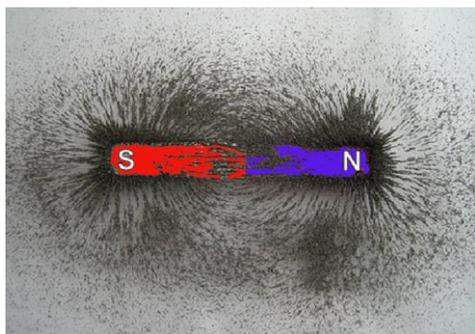
Измеряется вектор напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  в амперах на метр:  $[H] = \left[ \frac{A}{m} \right]$ ,

причём  $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$ , где  $\mu = \frac{B_{\text{в.веществе}}}{B_{\text{в.вакууме}}}$  - магнитная проницаемость вещества,  $[\mu] = [\text{безразмерная}]$

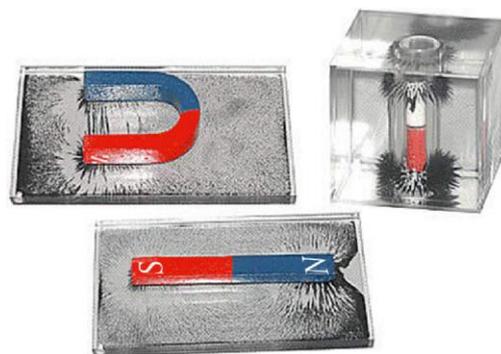
$B_{\text{в.веществе}}$  - индукция магнитного поля в веществе,  $B_{\text{в.вакууме}}$  - индукция магнитного поля в вакууме,  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$  - магнитная постоянная.

**Физический смысл магнитной проницаемости вещества  $\mu$  (мю):** она показывает, во сколько раз вещество усиливает магнитное поле по сравнению с вакуумом.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОВ



В 1269 г. французский исследователь П. Марикур помещая металлически опилки вблизи магнита, обратил внимание на то, что они определённым образом ориентируются вокруг него (см. рис). Этим было показано, что в пространстве вокруг



магнита существует силовое взаимодействие, которое назвали **магнитным**. Линии, образуемые железными опилками в магнитном поле, стали называть **силовыми линиями магнитного поля**.

Затем он изготовил магнит в виде тонкого длинного стержня, который будучи подвешенным на ниточке, всегда ориентировался в направлении север-юг, то есть один конец магнитной стрелки всегда показывал направление на север, а другой – на юг. В связи с этим П. Марикур ввел понятие **магнитного полюса**. Таким образом, любой магнит обладает двумя полюсами. Полюс, указывающий направление на север, назвали северным **N (Nord)**, а на юг - южным **S (Sude)**. Северный полюс магнитной стрелки обычно окрашивают в **синий** цвет, а южный полюс – в **красный** цвет.

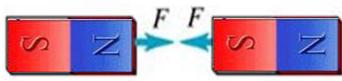


В зависимости от того, какими концами друг к другу повернуты магниты, они либо притягивались, либо отталкивались

Одноимённые полюса отталкиваются, а разноимённые – притягиваются

*Притягиваются*

*Отталкиваются*



(a)



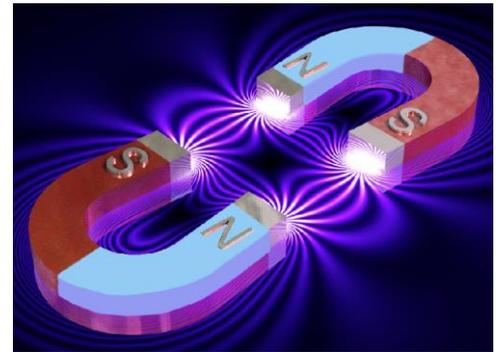
(c)



(b)



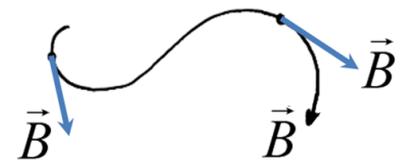
(d)



**Графическое изображение магнитных полей**

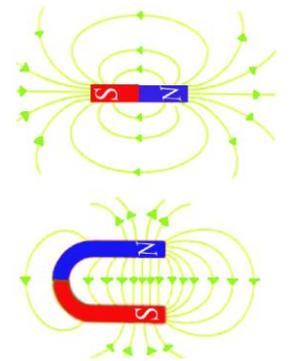
Магнитные поля графически изображаются с помощью *силовых линий*.

*Силовой линией магнитного поля* называется линия, касательная в каждой точке которой совпадает по направлению с вектором магнитной индукции.

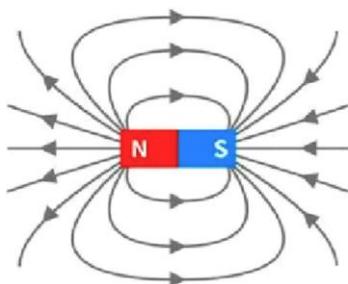
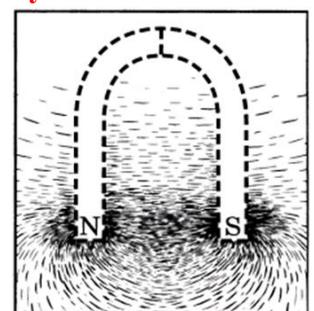
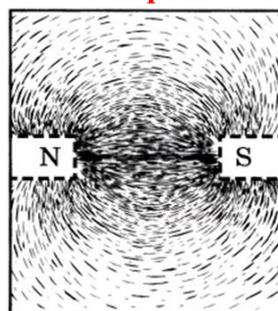
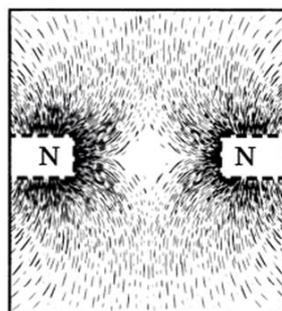
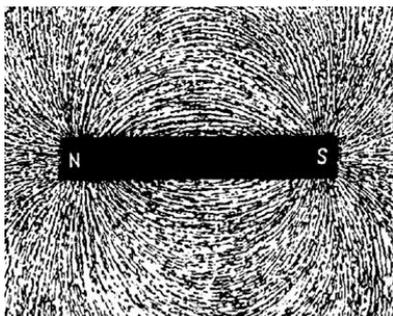


**Магнитное поле постоянного магнита**

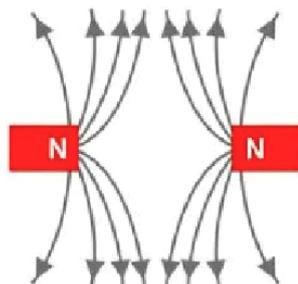
- Любой магнит имеет северный *N* и южный *S* полюса.
- В природе не существует магнитных зарядов, поэтому силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.
- Силовые линии выходят из **северного полюса магнитна** *N* и входят в **южный полюс магнита** *S* (см. рис).



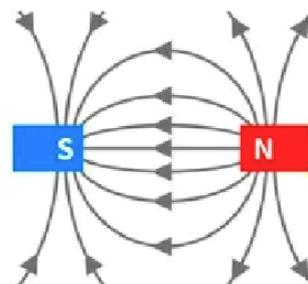
**Вид силовых линий магнитного поля в различных случаях**



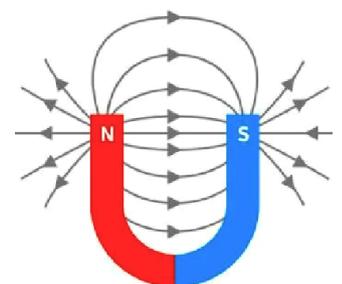
полосовой магнит



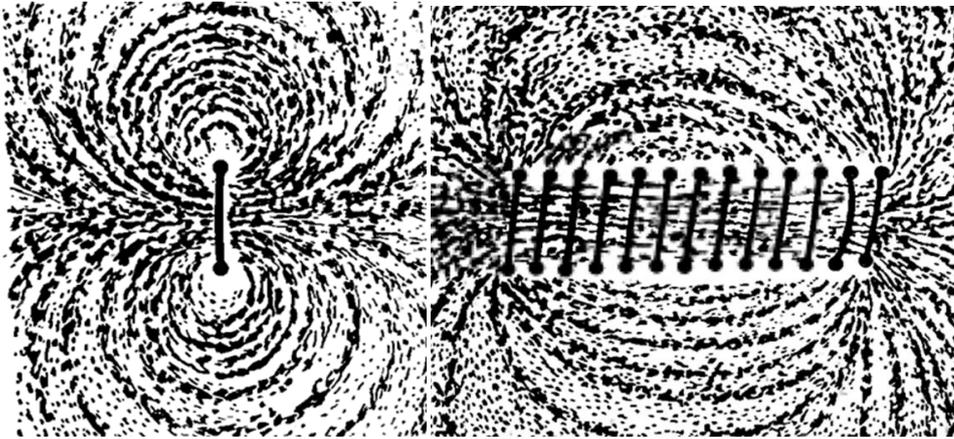
одноимённые полюса



разноимённые полюса



дугообразный магнит



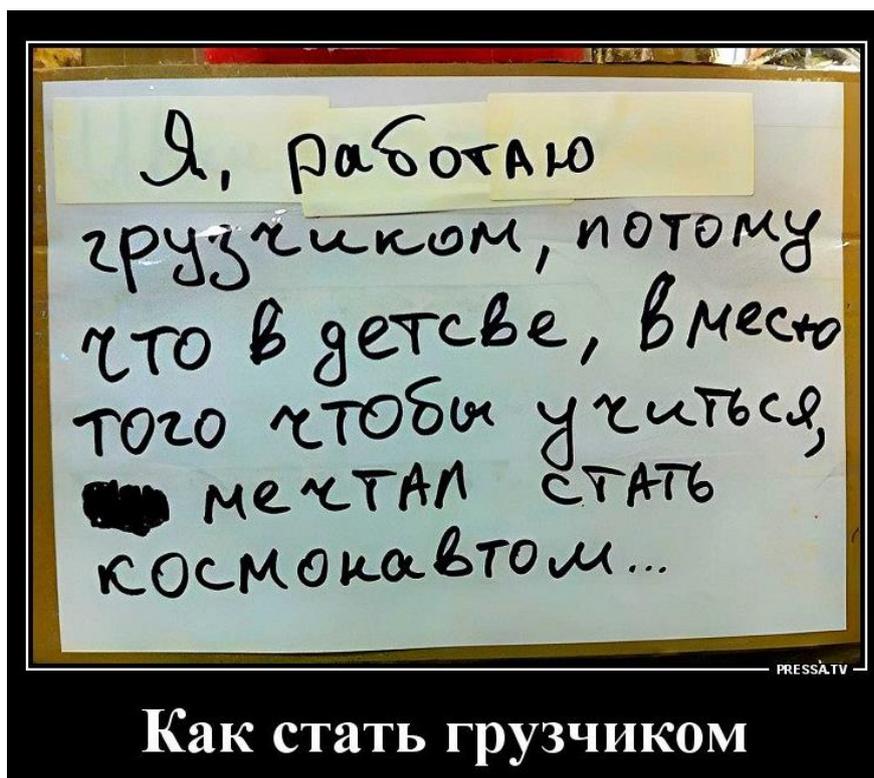
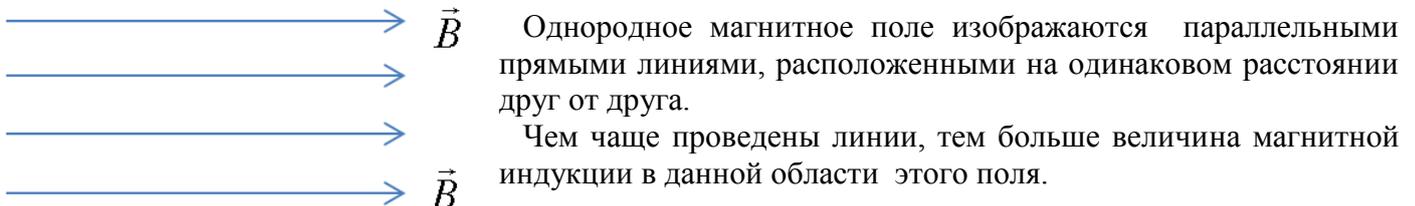
Силловые линии магнитного поля  
вокруг кругового витка с током

Силловые линии магнитного поля  
вокруг соленоида (катушки) с током

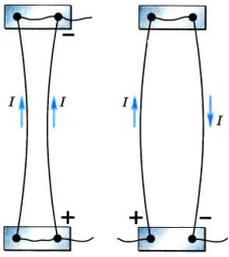


В природе не существует магнитных зарядов, поэтому силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. Такие поля называются *вихревыми*.

**Однородным магнитным полем** называется поле, в каждой точке которого вектор магнитной индукции имеет одну и ту же величину и направление.



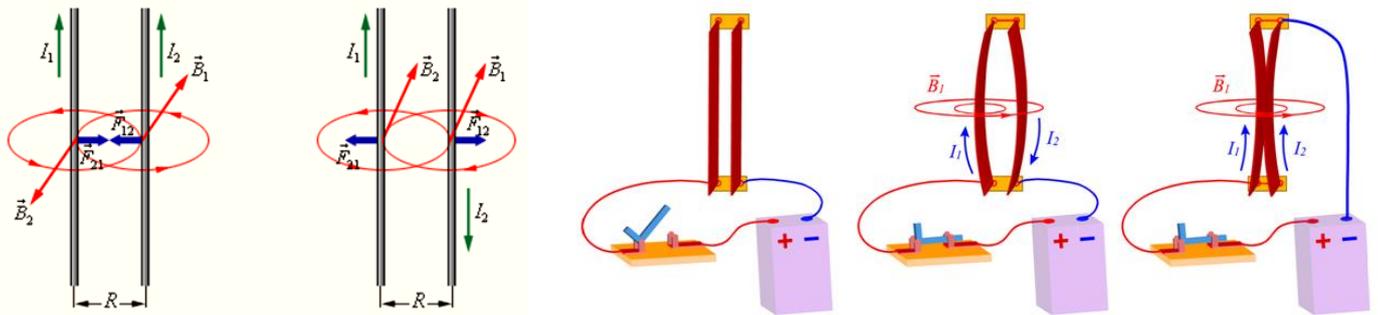
## Силовое взаимодействие параллельных проводников с током



Наблюдения показывают, что если через параллельные проводники пропускать ток одного направления, то они притягиваются друг к другу, а если ток противоположного направления – то отталкиваются, таким образом, проводники с током оказывают силовое воздействие друг на друга, которое нельзя объяснить наличием электрического поля, так как в целом проводники электрически нейтральны.

Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют **магнитными силами**.

Согласно теории близкодействия ток в одном из проводников не может непосредственно действовать на ток в другом проводнике. Электрический ток в одном из проводников создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток во втором проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.



Силу магнитного взаимодействия двух прямолинейных параллельных проводника с током можно определить по формуле:

$$F_{\text{магн}} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} l,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – силы тока в проводниках,  $A$ ;  $r$  – расстояние между проводниками,  $m$ ;  
 $l$  – длина проводника,  $m$



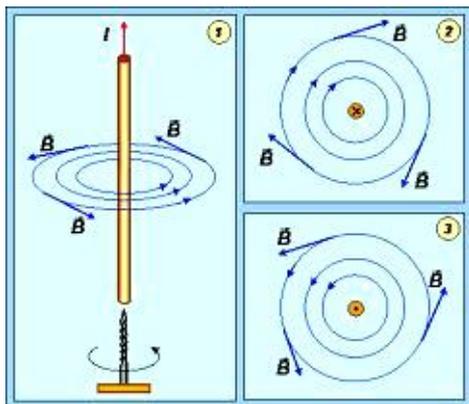
Гимнастика для ума



Сколько лиц на картинке?

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Любой проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле, которое обнаруживается по его действию на железные опилки или на магнитные стрелки.



Силловые линии проводника с током имеют вид концентрических окружностей (то есть окружностей с общим центром), расположенных перпендикулярно проводнику.

**Направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  проводника с током определяют по правилу буравчика:**

если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции. (см. рисунок)

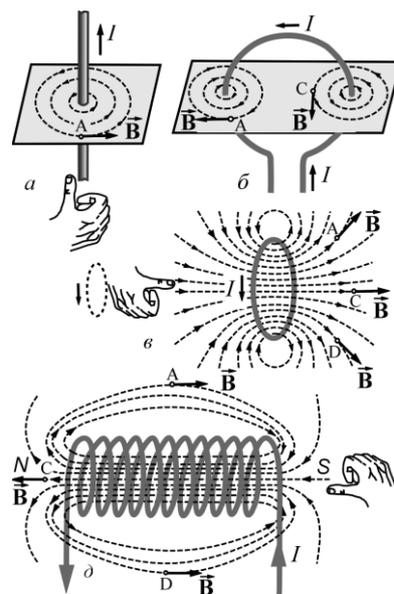
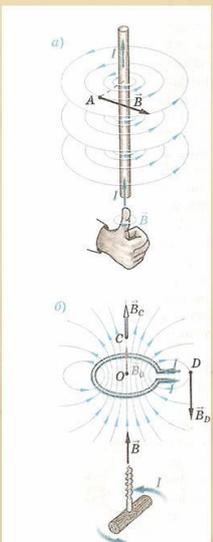
Направление силовых линий вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  можно определить и **по правилу правой руки:**

если обхватить проводник с током правой рукой так, чтобы большой палец совпадал с направлением тока в проводнике, то остальные пальцы руки укажут направление силовых линий магнитного поля этого тока.

Напомню, что вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  в каждой точке силовой линии направлен по касательной к ней (см. рисунки).

### Правило правой руки

- Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу правой руки или по правилу буравчика.
- Направление тока в прямом проводнике – направление большого пальца правой руки или острия буравчика. Направление магнитной индукции – направление охвата или направление ввинчивания буравчика.



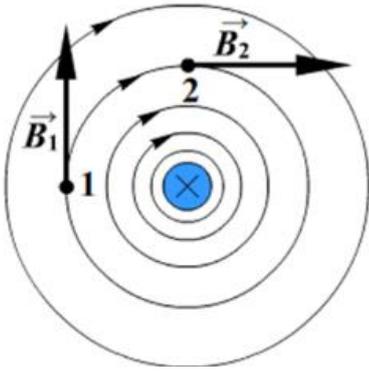
### Правило правой руки от Дмитрия Анатольевича



Правило буравчика двоичнику Вовке объясняли всей семьей.



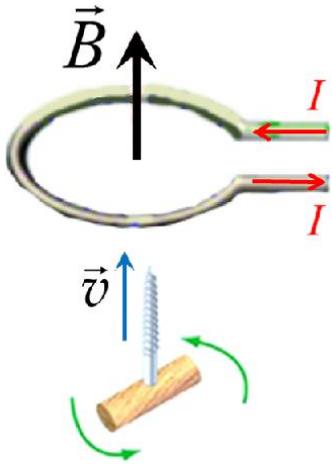
## Магнитное поле прямолинейного бесконечно длинного проводника с током



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

где  $I$  - сила тока в проводнике,  $A$ ;

$r$  - расстояние от центра проводника до рассматриваемой точки пространства,  $m$ .



## Магнитное поле в центре кругового витка с током

Направление вектора магнитной индукции в центре кругового витка с током можно определить **по правилу буравчика**:

если установить буравчик в центр витка с током перпендикулярно его поверхности и вращать рукоятку буравчика по направлению тока в этом витке, то поступательное движение буравчика укажет направление вектора магнитной индукции.

Снаружи этого витка с током направление магнитного поля будет противоположно вектору магнитной индукции в центре этого витка.

### Выбери себе буравчик



правило буравчика  
применяй правильно

### Магнитное поле в центре кругового проводника с током

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

где  $I$  - сила тока в витке с током,  $A$ ;

$R$  - радиус кругового витка с током,  $m$ .

### Принцип суперпозиции для магнитного поля

(позволяет определить характеристики результирующего магнитного поля)

Если в пространстве имеется несколько проводников с токами, то в каждой точке пространства магнитное поле создаётся каждым из проводников в отдельности независимо от наличия остальных.

Результирующая магнитная индукция поля в каждой точке пространства определяется по **принципу суперпозиции**:

*результующий вектор магнитной индукции в данной точке поля равен сумме векторов магнитной индукции, созданной различными токами в этой точке.*

$$\vec{B}_{рез} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n,$$

$$\vec{H}_{рез} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \dots + \vec{H}_n$$



### Сила Ампера

**Сила Ампера**  $\vec{F}_A$  (это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током)

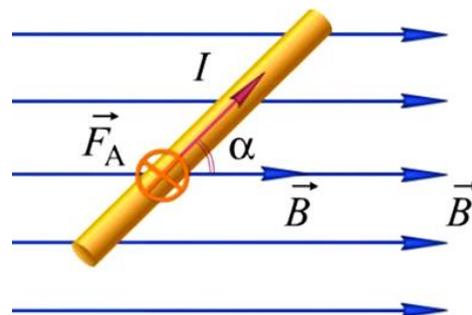
$$d\vec{F}_A = I [d\vec{l} \vec{B}] \text{ или } dF_A = IdlB \sin \alpha,$$

где  $I$  – сила тока в проводнике,  $A$

$B$  – магнитная индукция,  $Tл$

$d\vec{l}$  – вектор элемента тока,  $m$  (направлен по направлению тока)

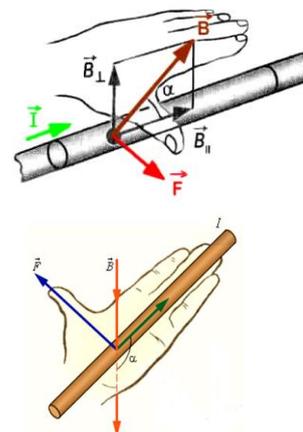
$\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$



Знаменитый Ампер был великим левшой:

Он  **$B I l$**  очень сильно, но левой рукой:

$$F_A = B I l \sin \alpha$$



Силовое воздействие на проводник с током в магнитном поле используется во всех электроизмерительных приборах и электрических машинах.

**Сила Лоренца  $F_L$** 

**Сила Лоренца  $F_L$**  (это сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряды)

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}] \quad \text{или} \quad F_L = |q|vB \sin \alpha,$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $q$  – заряд, Кл,

$v$  – скорость заряда, м/с

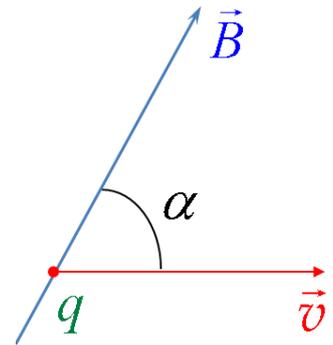
$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы Лоренца определяется:

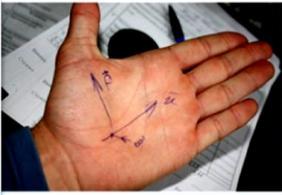
- для положительных зарядов по правилу **ЛЕВОЙ РУКИ**,



- для отрицательных зарядов по правилу **ПРАВОЙ РУКИ**

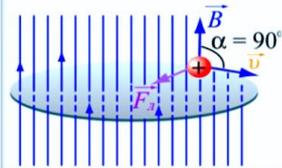
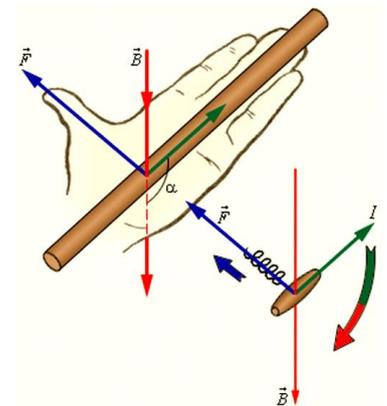


**Правило левой руки**



Направление **силы Лоренца** можно определить для положительных зарядов по **правилу левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а четыре пальца вытянутой руки были направлены по скорости заряда, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец руки покажет направление силы Лоренца

(для отрицательных зарядов направление силы Лоренца определяется по **правилу правой руки**)


**Ответы на МОЗГОломку №2 «Туристы» (стр. 40):**

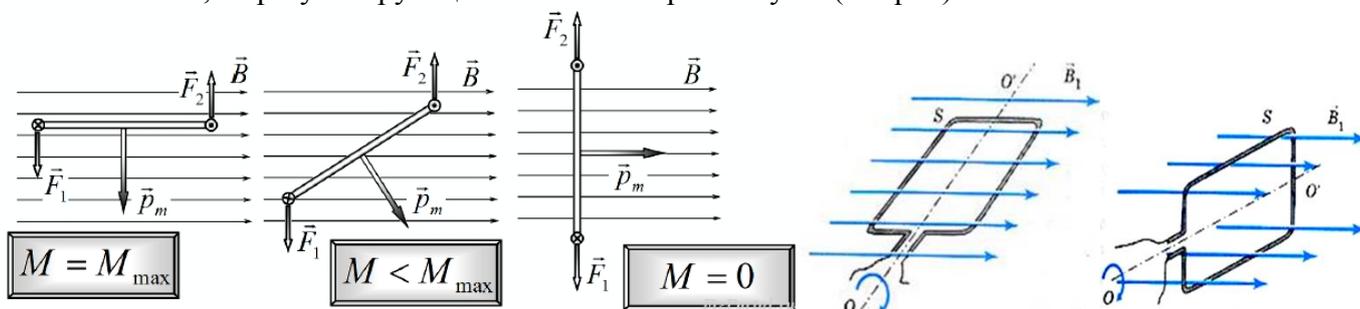
- Четверо.** Список дежурных, расположенный на дереве, распisan на четверых. Кроме того, на подстилке лежит 4 ложки и 4 тарелки.
- Не сегодня,** судя по паутине между деревом и палаткой, ребята приехали несколько дней назад.
- На лодке.** Около дерева стоят весла.
- Нет.** На картинке есть курица, значит, где-то рядом селение. Вряд ли ребята привезли её с собой.
- С юга.** На палатке есть флажок, по которому можно определить, откуда дует ветер. На картинке есть дерево: с одной стороны ветки короче, с другой длиннее. Как правило, у деревьев с южной стороны ветки длиннее.
- Утро.** Время дня можно определить по тени мальчика. По предыдущему вопросу мы определили, где север и юг. Если стать лицом на юг (левая сторона рисунка), то слева будет восток, а справа запад (вспомни географическую карту). Тень от мальчика направлена на запад, следовательно, Солнце находится на востоке и только восходит (тень длинная). Таким образом, сейчас утро.
- Он ловит бабочек.** Из-за палатки виден сачок.
- Дежурит Петя.** Судя по рисунку Коля что-то ищет в рюкзаке с буквой «К», Шура ловит бабочек, а Вася фотографирует природу (потому что из рюкзака с буквой «В» виден штатив от камеры). Значит, сегодня дежурит Петя, а вчера, согласно списку, дежурил Коля.
- Сегодня 8 августа. Судя по списку, прикреплённому к дереву, раз сегодня дежурит Петя, то число — 8. А поскольку на поляне лежит арбуз, и ещё летают бабочки, то, скорее всего, август (в сентябре друзья бы уже учились).

### Движение заряженных частиц в магнитном поле

- если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле параллельно силовым линиям этого поля, то сила Лоренца на неё действовать не будет (так как  $\alpha = 0$ , следовательно  $\sin 0 = 0$ ) и частица будет двигаться вдоль силовой линии,
- если заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно силовым линиям этого поля, то на неё будет действовать максимальная по величине сила Лоренца (так как  $\alpha = 90^\circ$ , то  $\sin 90 = 1$ ), направленная перпендикулярно силовым линиям поля и частица будет двигаться по окружности,
- если заряженная частица влетает в магнитное поле под некоторым углом  $\alpha \neq 0$  к силовым линиям этого поля, то частица будет двигаться по винтовой траектории вдоль силовой линии магнитного поля.

### Силовое воздействие магнитного поля на плоский контур с током

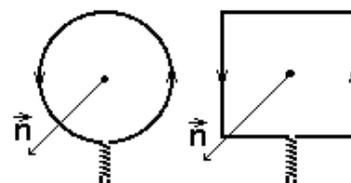
Контур с током, вносимые в магнитное поле испытывают ориентирующее действие со стороны этого поля. Форма контура роли не играет. Таким образом, на рамку с током в магнитном поле на противоположные стороны рамки действует пара сил  $\vec{F}$ , которая создаёт механический вращающий момент сил  $M$ . Опыт показывает, что этот момент сил  $M$  зависит от ориентации контура с током в магнитном поле. Максимальный момент действует на рамку с током, когда плоскость рамки расположена вдоль силовых линий магнитного поля, а если контур расположен перпендикулярно силовым линиям, то результирующий момент сил равен нулю (см. рис)



За направление магнитного поля принимают направление вектора положительной нормали  $\vec{n}$  в данном месте расположения контура с током.

**Положительной** называют нормаль, восстановленную в центре контура, удовлетворяющую **правилу буравчика** (или правилу **правого винта**):

если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в контуре, то поступательное движение буравчика укажет направление положительной нормали.



### Магнитный механический момент сил, действующий на рамку с током в магнитном поле

Величину механического вращательного момента, действующего на рамку с током в магнитном поле, можно определить по формуле:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}] \quad \text{или} \quad M = IBS \sin \alpha = p_m B \sin \alpha,$$

где  $M$  – механический момент сил,  $H \cdot m$ , Ньютон – метр.

$\vec{p}_m = IS \vec{n}$ , где  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности,

$$p_m = IS - \text{магнитный момент контура с током, } A \cdot m^2,$$

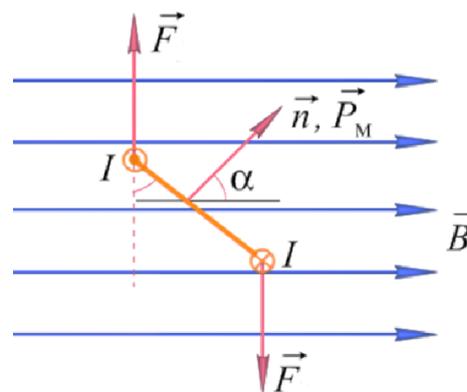
$$[p_m] = A \cdot m^2, \text{ Ампер - метр квадратный;}$$

$I$  – сила тока в проводнике,  $A$

$S$  – площадь контура,  $m^2$

$I$  – сила тока в проводнике,  $A$

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ .



### Закон Био - Савара - Лапласа

Используя принцип суперпозиции, можно определить индукцию магнитного поля от совокупности множества источников поля, если бы удалось установить закон, определяющий индукцию поля от некоторого элементарного источника. Таковым может быть принят точечный заряд  $dq$ , движущийся с известной скоростью  $\vec{v}$ , или бесконечно малый элемент проводника  $dl$ , по которому течёт ток силой  $I$ .

Такой закон был установлен опытным путём в 1820г французскими учёными Био и Саваром и теоретически сформулирован Лапласом, названный впоследствии законом Био – Савара - Лапласа.

В качестве элементарного источника магнитного поля берётся элемент проводника  $dl$ , которому присваивается векторное значение  $d\vec{l}$ , совпадающее с направлением тока  $I$  в этом элементе (рис. 1). Положение точки  $M$  в которой определяется индукция  $d\vec{B}$ , задаётся радиус вектором  $\vec{r}$ , проведённым из начала элемента  $d\vec{l}$  в точку  $M$ . Тогда в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа дифференциальное значение индукции  $d\vec{B}$  в точке  $M$ , созданное элементом тока  $I d\vec{l}$  равно

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

где  $d\vec{B}$  - магнитная индукция поля, создаваемого элементом проводника с током  $d\vec{l}$ ;

$\mu$  - магнитная проницаемость вещества, в котором находится проводник;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} - \text{магнитная постоянная, Генри на метр};$$

$d\vec{l}$  - вектор, равный по модулю длине проводника  $dl$  и совпадающий по направлению с током,  $M$ ;

$I$  - сила тока в проводнике,  $A$ ;

$\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный от середины элемента проводника к точке  $M$ , магнитная индукция в которой определяется,  $M$ .

$I d\vec{l}$  элемент тока,  $A \cdot m$ , Ампер - метр.

Направление вектора  $d\vec{B}$  определяется по правилам векторного произведения или **по правилу буравчика**:

Если параллельным переносом соединить вектора  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  в точке  $M$ , там же установить перпендикулярно этим векторам буравчик и вращать рукоятку буравчика по кратчайшему повороту от первого сомножителя в векторном произведении  $d\vec{l}$  ко второму  $\vec{r}$ , то поступательное движение буравчика покажет направление вектора  $d\vec{B}$ .

Величину вектора  $d\vec{B}$  в точке  $M$  можно определить по формуле

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Из (1) следует, что во всех точках, удалённых от проводника с

током на одинаковое расстояние  $r$  при фиксированном положении элемента  $d\vec{l}$  (то есть  $\alpha$  неизменно), величина индукции  $d\vec{B}$  остаётся неизменной.

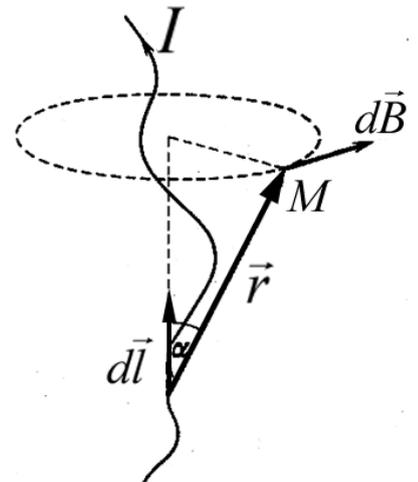
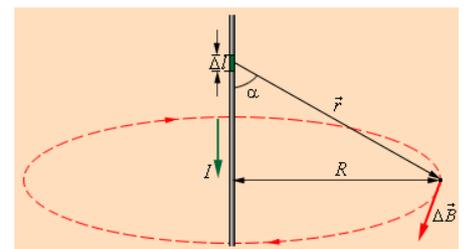


Рис. 1



То есть силовые линии элемента тока  $I d\vec{l}$  представляют собой окружности с центром на оси проводника. Кроме того, также следует, что для некоторой фиксированной точки  $M$  направление вектора  $d\vec{B}$  в этой точке не зависит от положения элемента  $d\vec{l}$  на оси прямолинейного тока. Поэтому при использовании принципа суперпозиции для определения индукции поля от множества элементов проводника с током  $I$  можно индукции  $dB$  складывать алгебраически, выражая суммирование интегрированием по всей длине проводника:

$$B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha. \quad (2)$$

### Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком прямолинейного проводника

На основании уравнения (2) для какого-либо участка прямолинейного проводника с током длиной  $L$  (см. рис. 2 а) можно получить следующее

уравнение:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

При симметричном расположении концов проводника относительно точки, в которой определяется магнитная индукция (см.рис. 2 б),

получим следующее уравнение:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos \varphi.$$

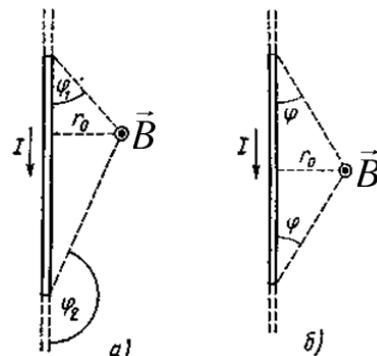


Рис.2

### Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямолинейным проводником с током

Аналогично, решая уравнение (2) для бесконечно длинного прямолинейного проводника с током, получим формулу

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

где  $r$  - кратчайшее расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки,  $M$ .

### Потенциальная (механическая) энергия контура с током в магнитном поле

$$W_{II} = -\vec{p}_m \vec{B} = p_m B \cos \alpha$$

где  $\alpha$  - угол между направлением вектора  $\vec{p}_m$  (или  $\vec{n}$ ) и вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$ .



### Циркуляция вектора $\vec{B}$

Циркуляцией вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  называется криволинейный интеграл вдоль замкнутого контура вида:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl$$

где  $B_l = dl \cos \alpha$  - проекция вектора магнитной индукции на направление элементарного перемещения  $dl$  вдоль контура  $L$ ,  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$ .

### Теорема о циркуляции вектора $\vec{B}$ в вакууме

(закон полного тока для магнитного поля в вакууме)

Циркуляция вектора  $\vec{B}$  магнитного поля в вакууме вдоль произвольного замкнутого контура равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i,$$

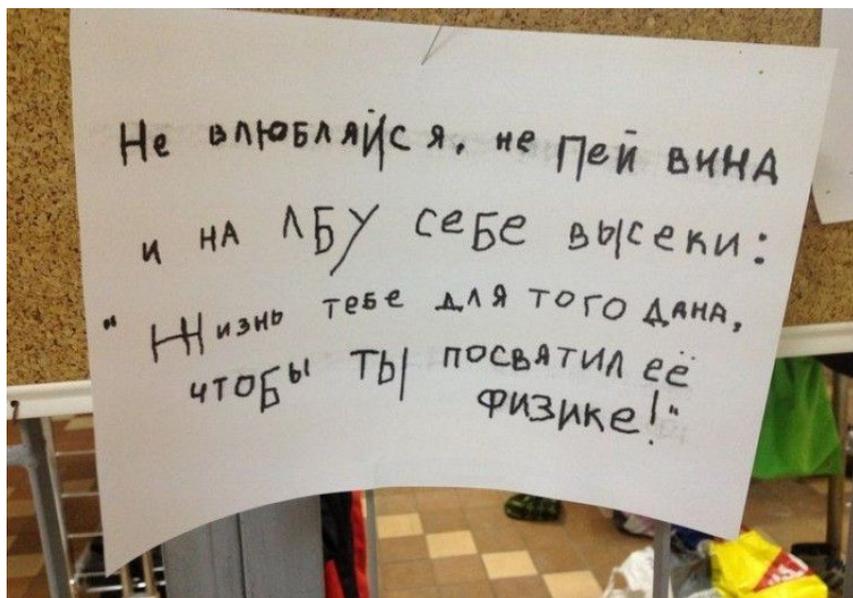
где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\sum_{i=1}^n I_i$  - алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром.

### Закон полного тока в веществе

Циркуляция вектора  $H$  магнитного поля в веществе вдоль произвольного замкнутого контура равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i,$$

$\sum_{i=1}^n I_i$  — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром.



Ты понял, что я тебе сказала?

### Элементарный магнитный поток (поток магнитного поля)

$$d\Phi = (\vec{B}d\vec{S}) = B dS \cos \alpha,$$

где  $\Phi$  - магнитный поток,  $[\Phi] = [B\delta]$  - Вебер ;

$dS$  - элемент площади поверхности,  $M^2$ ;

$B$  - индукция магнитного поля,  $Tл$ ;

$\vec{n}$  - единичный вектор нормали к плоскости рамки;

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и вектором нормали к плоскости рамки  $\vec{n}$ .

### Поток однородного магнитного поля через плоскую поверхность

Потоком однородного магнитного поля через какую-либо плоскую поверхность называется скалярная величина, равная

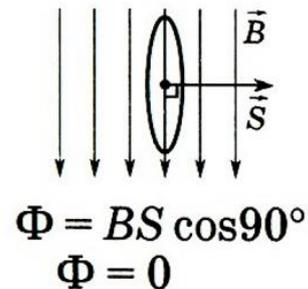
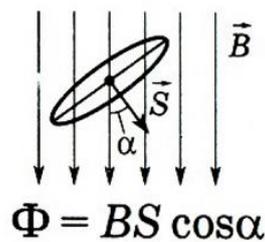
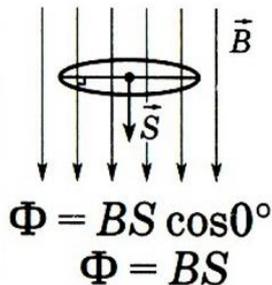
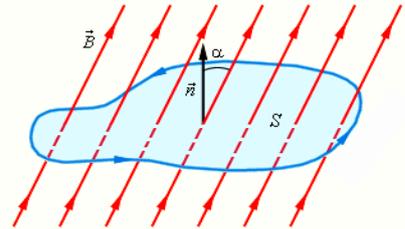
$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где  $\Phi$  - магнитный поток,  $[\Phi] = B\delta$  - Вебер

$S$  - площадь контура,  $M^2$ ;

$\vec{n}$  - вектор положительной нормали к плоскости контура,

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$



### Поток магнитного поля через произвольную поверхность

Если магнитное поле неоднородно или поверхность не плоская, то

$$\Phi = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S B_n dS,$$

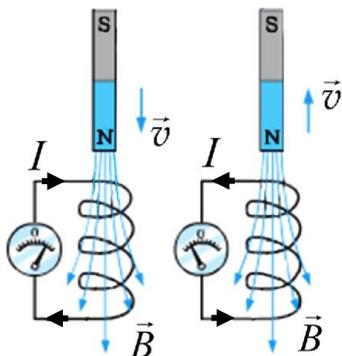
где интегрирование ведется во всей поверхности  $S$ ,

$B_n = B \cos \alpha$  - проекция вектора  $\vec{B}$  на нормаль  $\vec{n}$  к поверхности в данной точке поля,

$\alpha$  - угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$ .

### Опыты Фарадея (1831 г)

(позволили обнаружить явление *электромагнитной индукции*)



- при вдвигании и выдвигании магнита, в катушке возникает электрический ток, который называют индукционным (то есть наведённым) током.

- при вдвигании магнита, ток в катушке течёт в одном направлении, а при выдвигании магнита, ток течёт в обратном направлении,

- чем быстрее скорость магнита относительно катушки, тем сильнее по величине ток возникает, и наоборот.

- если магнит неподвижен относительно катушки, то тока нет.

Так было обнаружено явление *электромагнитной индукции*.

*Электромагнитной индукцией* (ЭМИ) называется явление возникновения в замкнутом проводящем контуре электрического тока, при изменении магнитного потока пронизывающего этот контур.

### Закон Фарадея для электромагнитной индукции

ЭДС электромагнитной индукции  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$ , возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность этого контура и существует в течение всего времени изменения магнитного потока:

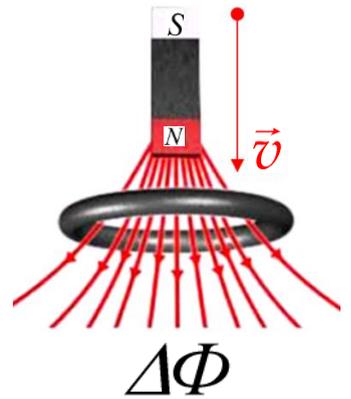
$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  - мгновенное значение ЭДС индукции, В, Вольт;

$d\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  - изменение магнитного потока через контур, Вб;

$dt$  - время изменения магнитного потока, с

(знак минус в законе Фарадея позволяет через **правило Ленца** определить направление индукционного тока в замкнутом контуре).



Среднее значение ЭДС индукции  $\langle \mathcal{E}_{\text{инд}} \rangle$  за какой-то промежуток времени  $\Delta t$  можно определить по формуле:

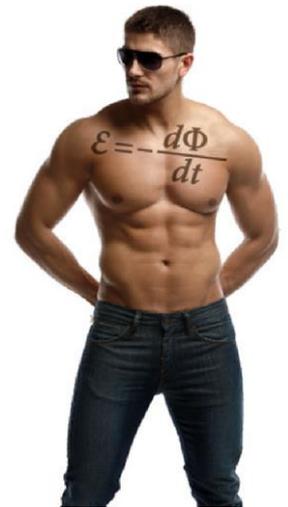
$$\langle \mathcal{E}_{\text{инд}} \rangle = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Если магнитное поле пронизывает катушку из  $N$  одинаковых витков, то возникающая в катушке общая ЭДС, в  $N$  раз больше, чем ЭДС в одном отдельно взятом витке:

$$\langle \mathcal{E}_{\text{инд}} \rangle = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Физический смысл явления электромагнитной индукции:** переменное магнитное поле создаёт вокруг себя вихревое электрическое поле, которое и является причиной возникновения тока в проводящем контуре.

Вихревое электрическое поле возникает всегда при изменении магнитного поля в не зависимости от того, в какой среде это происходит (то есть в вакууме, проводнике или диэлектрике).



Не забуду ЭДС

### Правило Ленца

Знак минус в законе Фарадея позволяет через правило Ленца определить направление индукционного тока в замкнутом контуре.

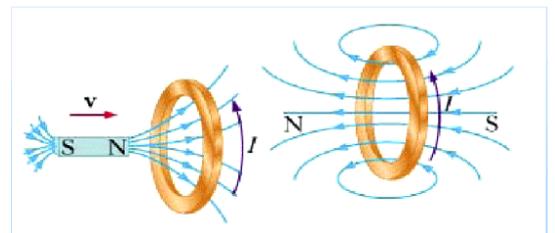
**Правило Ленца** (1833):

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле препятствует изменению внешнего магнитного поля, которое вызвало этот индукционный ток.

То есть,

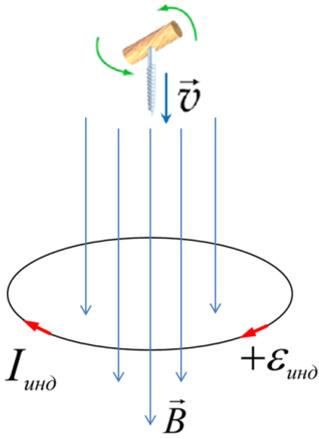
- если магнитный поток  $\Phi$  через контур уменьшается, то магнитное поле индукционного тока сонаправлено с внешним магнитным полем,

- если магнитный поток  $\Phi$  через контур увеличивается, то магнитное поле индукционного тока направлено в противоположную сторону внешнего магнитного поля.



**Правило знаков для ЭДС индукции**

Положительное направление  $\mathcal{E}_{инд}$  связано с направлением внешнего магнитного поля **правилом буравчика**:



если поступательное движение буравчика совпадает с направлением внешнего магнитного поля, то направление рукоятки буравчика покажет положительное направление  $\mathcal{E}_{инд}$ .

Таким образом:

- если магнитный поток возрастает, то есть  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ , то  $\mathcal{E}_{инд}$  отрицательная,

- если магнитный поток убывает, то есть  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ , то  $\mathcal{E}_{инд}$  положительная.

**Алгоритм определения направления индукционного тока**

$\Delta\Phi > 0$

$\Delta\Phi < 0$

$\Delta\Phi$  характеризуется изменением числа линий  $B_i$ , пронизывающих контур.

1. Определить направление линий индукции внешнего поля  $B$  (выходят из  $N$  и входят в  $S$ ).
2. Определить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через контур (если магнит вдвигается в кольцо, то  $\Delta\Phi > 0$ , если выдвигается, то  $\Delta\Phi < 0$ ).
3. Определить направление линий индукции магнитного поля  $B'$ , созданного индукционным током (если  $\Delta\Phi > 0$ , то линии  $B$  и  $B'$  направлены в противоположные стороны; если  $\Delta\Phi < 0$ , то линии  $B$  и  $B'$  сонаправлены).
4. Пользуясь правилом буравчика (правой руки), определить направление индукционного тока.

Другими словами, если магнитный поток через контур увеличивается, то индукционный ток будет иметь такое направление, при котором создаваемое им магнитное поле будет направлено против внешнего поля, противодействуя увеличению магнитного потока.

Если же магнитный поток через контур уменьшается, то индукционный ток будет направлен так, чтобы его магнитное поле совпадало по направлению с внешним магнитным полем.

Пусть, например, в однородном магнитном поле находится проволочная квадратная рамка, пронизываемая магнитным полем.

Предположим, что магнитное поле возрастает. Это приводит к увеличению магнитного потока через площадь рамки. Согласно правилу Ленца, магнитное поле, возникающего индукционного тока, будет направлено против внешнего поля, т.е. вектор  $\vec{B}_2$  этого поля противоположен вектору  $\vec{B}_1$ . Применяя правило правого винта, находим направление индукционного тока  $I_i$ .

**ЭДС индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле**  
 Опыт показывает, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает между его концами ЭДС индукции, которую можно определить по формуле:

$$\mathcal{E}_{инд} = vB_{\perp} l \sin \alpha,$$

где  $\mathcal{E}_{инд}$  - ЭДС индукции в проводнике, В;

$B_{\perp}$  - перпендикулярная составляющая вектора магнитной индукции к плоскости движения проводника, Тл ;

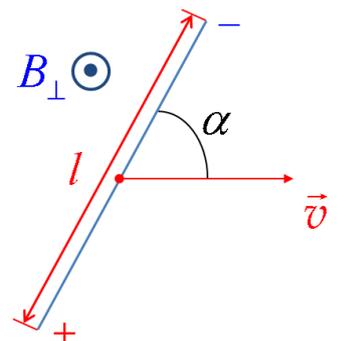
$v$  - скорость проводника, м/с;  $l$  - длина проводника, м;

$\alpha$  - угол между вектором скорости  $\vec{v}$  и осью проводника.

Бабочка летела в синий лес, Бабочка летела  $v$  синий лес,

Вот тебе и ЭДС: Вот тебе и ЭДС  $\mathcal{E}$  :

$$\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$$



### Индуктивность контура

Когда по замкнутому контуру течёт ток силой  $I$ , то он создаёт вокруг себя магнитное поле, которое пронизывает площадь, охватываемую этим контуром, создавая собственный магнитный поток  $\Phi_{\text{собст}}$  через поверхность этого контура. Известно, что магнитный поток  $\Phi$  пропорционален величине индукции магнитного поля  $B$ , которая, в свою очередь, пропорциональна силе тока  $I$ . Таким образом:

$$\Phi_{\text{собст}} = LI,$$

где  $\Phi_{\text{собст}}$  - собственный магнитный поток через поверхность контура,  $B\delta$ ;

$I$  - сила тока в контуре,  $A$ ;

$L$  - индуктивность контура,  $Гн$ , Генри.

**Индуктивность контура  $L$**  является коэффициентом пропорциональности между магнитным потоком  $\Phi_{\text{собст}}$  через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока  $I$  в контуре.

*Индуктивность контура зависит только от его геометрических размеров и формы, а также от магнитных свойств среды, в которой он находится, и не зависит от материала контура и величины тока в нём.*

Необходимо отметить, что если магнитная проницаемость среды, окружающей проводник, не зависит от индукции магнитного поля, создаваемого током, текущим по проводнику, то индуктивность данного проводника является постоянной величиной при любой силе тока, идущего в нём. Это имеет место, когда проводник находится в среде с диамагнитными или парамагнитными свойствами.

В случае ферромагнитной среды индуктивность контура зависит от силы тока, проходящего по проводнику.

$1 Гн$  — индуктивность такого проводника, при протекании по которому тока силой  $1A$  возникает магнитный поток, пронизываю площадь, охватываемую проводником, равный  $1Вб$ .



Победа не всегда  
означает быть первым.  
Победа – это когда ты стал  
лучше, чем ты был.



## Явление самоиндукции

**Самоиндукцией** называется явление возникновения в замкнутом проводящем контуре ЭДС индукции при изменении силы тока в этом контуре.

### Закон Фарадея для явления самоиндукции

ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{сам}$ , возникающая в замкнутом контуре, прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре и существует в течение всего времени изменения тока в контуре:

$$\mathcal{E}_{сам} = -\frac{d\Phi_{собст}}{dt} = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $\left[ \mathcal{E}_{сам} \right] = B$  - ЭДС самоиндукции, Вольт,

$d\Phi_{собст} = \Phi_2 - \Phi_1$  - изменение собственного магнитного потока, Вб;

$dt$  - время изменения собственного магнитного потока, с;

$d\Phi_{собст} = LdI$  - изменение собственного магнитного потока контура с током, Вб;

$L$  (эль) - индуктивность контура или соленоида, Гн (Генри).



**Королева самоиндукции**

Среднее значение ЭДС самоиндукции  $\langle \mathcal{E}_{сам} \rangle$  в одном контуре за какой-то промежуток времени  $\Delta t$  можно определить по формуле:

$$\langle \mathcal{E}_{сам} \rangle = -\frac{\Delta\Phi_{собст}}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

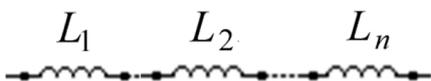
Если явление самоиндукции возникает в катушке с током из  $N$  одинаковых витков, то возникающая в катушке общая ЭДС самоиндукции в  $N$  раз больше, чем ЭДС в одном отдельно взятом витке:

$$\langle \mathcal{E}_{сам} \rangle = -N \frac{\Delta\Phi_{собст}}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где  $L$  - индуктивность катушки (соленоида), Гн.

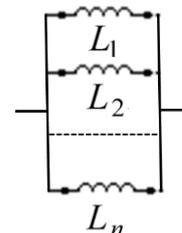
### Соединение проводящих контуров

#### Последовательное соединение



$$L_{общ} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

#### Параллельное соединение



$$\frac{1}{L_{общ}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

# ОДТЧПШСВДД

Что означает этот порядок букв?

## Работа сил магнитного поля по перемещению проводника или контура с током

$$A_{мп} = I \Delta \Phi,$$

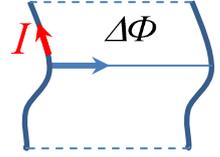
где  $A_{мп}$  - работа сил магнитного поля, Дж;

$I$  - сила тока в проводнике или контуре, А;

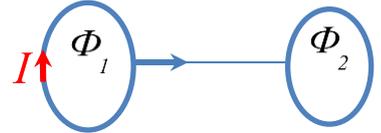
$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  - изменение магнитного потока через контур, Вб

Возможны два случая:

1. Если перемещается проводник с током, то  $\Delta \Phi$  - это поток магнитного поля через поверхность, которую «заметает» проводник при своём движении,



2. Если перемещается контур с током, то  $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  - это изменение потока магнитного поля через поверхность контура, при его движении.



### Энергия магнитного поля контура или соленоида (катушки индуктивности) с током

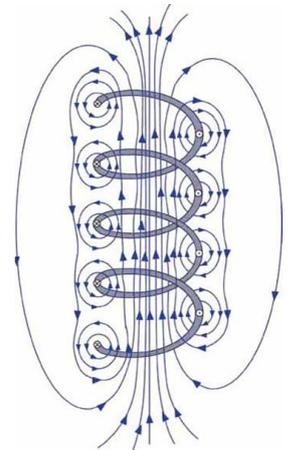
Когда в контуре или соленоиде течёт ток, то вокруг них возникает магнитное поле, энергию которого можно определить по формуле:

$$W_{мп} = \frac{LI^2}{2}$$

где  $W_{мп}$  - энергия магнитного поля, Дж;

$L$  - индуктивность контура или соленоида, Гн;

$I$  - сила тока в контуре или соленоиде, А.



#### Уважаемые ребята от 18 до 25 лет!

Туристическая фирма «**ВОЕНКОМАТ**» приглашает Вас в удивительное приключение в любую точку страны сроком на 1 год. Вы сможете посетить такие экзотические места нашей Родины, как Крайний север, Дальний восток, тайгу Сибири, а также горы Урала или Кавказа.

Вы сможете даже покупаться в тёплых водах Черного моря на побережье полуострова Крым и посмотреть ещё много чего интересного.

Во время путешествия Вас ожидает бесплатное путешествие в пятизвёздочном отеле под названием «**Казарма**», где за Вами круглосуточно будет заботиться персонал отеля, в частности, товарищ сержант срочной службы.

Вам будет доступно бесплатное трёхразовое питание с такими деликатесами как сечка, овсянка, перловка и многое другое, а также все виды услуг, включая прекрасную баню и лечение за счёт государства!!!

Кроме этого Вы испытаете весь спектр развлечений в играх «**Подъём-отбой**», «**Марш-бросок**», «**Строевая подготовки**» и «**ФНЗО**», а также примите участие в конкурсе «Парково-хозяйственный день».

Вы насладитесь великолепным видом забора из колючей проволоки, а также архитектурными шедеврами таких строений как **ШТАБ**, **САНЧАСТЬ**, **АВТОМОБИЛЬНЫЙ ПАРК** и многих других.

*С нетерпением приглашаем Вас в наше незабываемое Путешествие!*

## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПРОВОДНИКОМ С ТОКОМ И ДВИЖУЩИМИСЯ ЗАРЯДАМИ

Здесь можно выделить задачи о взаимодействии однородного магнитного поля с проводником с током и движущимися заряженными частицами, а также задачи о явлении электромагнитной индукции и самоиндукции.

Однородное магнитное или электрическое поле изображается с помощью силовых линий, которые имеют вид параллельных прямых, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга.

1. сделать схематический чертёж, указав на нём проводник с током, контур с током или движущуюся заряженную частицу,
2. показать направление силовых линий магнитного поля, отметив углы между направлением вектора магнитной индукции и проводником, отдельными элементами контура или вектором начальной скорости частицы и указать заряд частицы.

3. Записать формулы для определения силы Ампера  $F_A = IBl \sin \alpha$  или силы Лоренца  $F_L = |q|vB \sin \alpha$ .

Если этого оказывается достаточно, то дорешать задачу.

4. Если этого недостаточно, то возможно это задача на динамику или статику. В этом случае определить и нарисовать все силы, действующие на проводник с током, контур с током или частицу, записать уравнение динамики и решить его. При необходимости использовать дополнительно уравнения кинематики или законы сохранения или изменения.
5. Если понадобится использовать законы сохранения или изменения, то выполняют пункт 2 для моментов времени, о которых есть информация в задаче, записывают законы сохранения или изменения импульса или полной механической энергии и решают полученную систему уравнений.

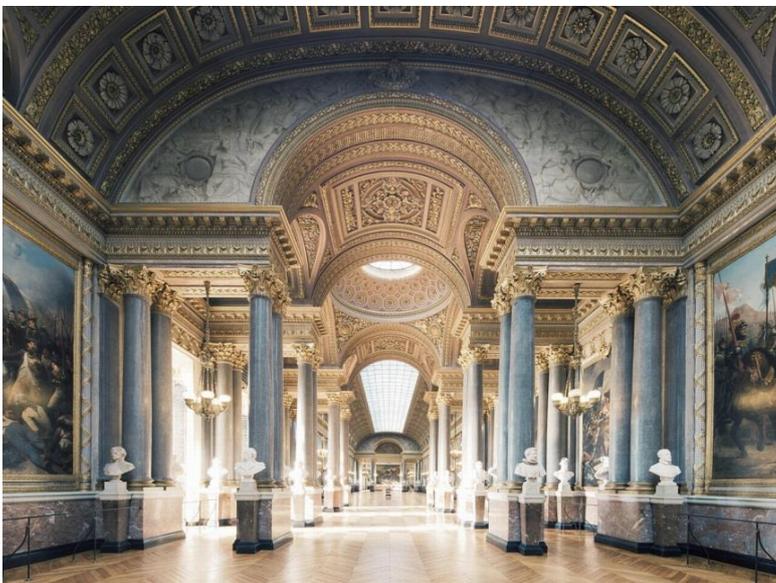
## СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И САМОИНДУКЦИИ

1. Сделать схематический чертёж, указав на нём контур с током,
2. показать направление силовых линий магнитного поля, отметив углы между направлением вектора магнитной индукции и нормалью к плоскости контура,

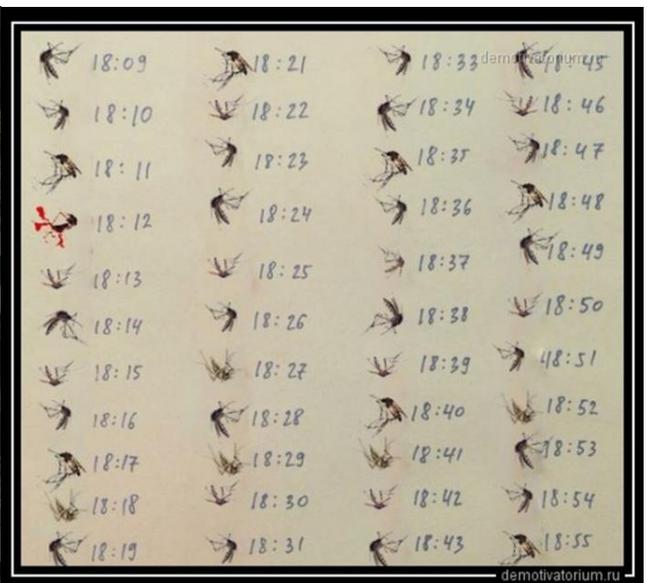
3. Записать закон Фарадея  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

При этом следует установить, за счёт чего изменяется величина магнитного потока  $\Delta \Phi$ :

- в результате изменения магнитной индукции  $\Delta B$ ;
- за счёт изменения площади контура  $\Delta S$ ;
- или в результате изменения ориентации контура в магнитном поле.



Комната в общежитии



Как я провёл вечер в ней

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА. МАГНЕТИКИ

Все вещества при внесении их в магнитное поле проявляют магнитные свойства и взаимодействуют с магнитами.

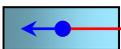
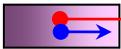
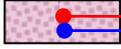
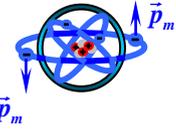
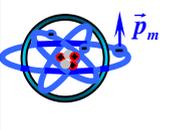
По их поведению в магнитном поле и силе взаимодействия с магнитами все вещества разделили на три основные группы:

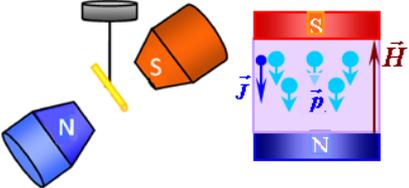
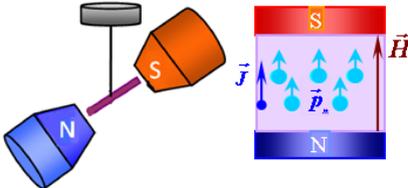
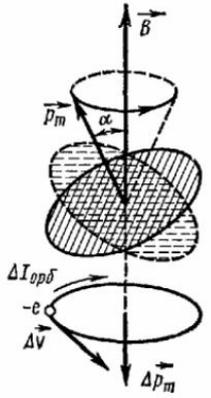
- диамагнетики,
- парамагнетики,
- ферромагнетики.

Магнитные свойства тел обусловлены магнитными свойствами их атомов или молекул, а в конечном счёте движением электрических зарядов в них и по современным представлениям обусловлены тремя причинами:

1. орбитальным движением электронов вокруг ядра атома,
2. спином электронов,
3. спином атомных ядер.

Существует три основных вида магнетиков:

<b>Диамагнетики</b>	<b>Парамагнетики</b>	<b>Ферромагнетики</b>
<p>Вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются в противоположном направлении вектора <math>\vec{B}</math> этого поля, в результате чего магнитное поле внутри диамагнетика слегка уменьшается.</p>	<p>Вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются по направлению вектора <math>\vec{B}</math> этого поля, в результате чего магнитное поле внутри парамагнетика слегка увеличивается.</p>	<p>Твёрдые вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются по направлению вектора <math>\vec{B}</math> этого поля, в результате чего магнитное поле внутри ферромагнетика сильно увеличивается.</p>
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Газы: <math>H_2, N_2, Cl_2</math> инертные газы Металлы: <math>Zn, Cu, Au, Ag, Hg</math> Диэлектрики: <math>Si, H_2O, NaCl</math></p> <p>●→ направление внешнего магнитного поля ●→ направление собственного магнитного поля</p> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Газы: <math>O_2</math></p> <p>Металлы: <math>Al, Mg, Na, Pt, Mn</math> Диэлектрики:</p> <p>●→ направление внешнего магнитного поля ●→ направление собственного магнитного поля</p> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>Металлы: <math>Fe, Ni, Co</math></p> <p>●→ направление внешнего магнитного поля ●→ направление собственного магнитного поля</p> </div> </div>
<p>К <b>диамагнетикам</b> относятся вещества, магнитные моменты атомов, молекул или ионов которых в отсутствии внешнего магнитного поля равны нулю (то есть магнитные моменты всех электронов такого атома скомпенсированы)</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>отсутствии внешнего магнитного поля равны нулю (то есть магнитные моменты всех электронов такого атома скомпенсированы)</p> </div> </div> <p><b>Диамагнитная</b> палочка в магнитном поле устанавливается перпендикулярно силовым линиям поля.</p>	<p>К <b>парамагнетикам</b> относятся вещества, атомы, молекулы или ионы которых имеют собственные магнитные моменты даже при отсутствии внешнего магнитного поля (то есть магнитные моменты всех электронов такого атома полностью нескомпенсированы)</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div style="margin-left: 10px;"> <p>отсутствии внешнего магнитного поля (то есть магнитные моменты всех электронов такого атома полностью нескомпенсированы)</p> </div> </div> <p><b>Парамагнитная</b> палочка в магнитном поле устанавливается вдоль силовых линий поля.</p>	<p>К <b>ферромагнетикам</b> относятся вещества, атомы, молекулы или ионы которых имеют собственные магнитные моменты даже при отсутствии внешнего магнитного поля и которые при не слишком высоких температурах обладают самопроизвольной (то есть спонтанной) намагниченностью, сильно изменяющейся под влиянием внешних воздействий (магнитного поля, деформации, температуры)</p>

												
<p><b>Диамагнетизм</b> объясняется прецессией Лармора электронных орбит атомов при внесении этого вещества во внешнее магнитное поле (диамагнитными свойствами обладают все вещества)</p> 	<p><b>Парамагнетизм</b> объясняется тем, что при внесении парамагнетика во внешнее поле магнитные моменты атомов начинают ориентироваться преимущественно по полю, хотя тепловое движение атомов этому препятствует. В результате чего магнитное поле внутри парамагнетика слегка усиливается.</p>	<p><b>Ферромагнетизм</b> объясняется тем, что при температурах ниже, так называемой, температуры Кюри, весь ферромагнетик разбит на маленькие области – <b>домены</b>, размеры которых порядка <math>10^{-6}</math> м и которые самопроизвольно намагничены до насыщения.</p> <table border="1" data-bbox="1066 806 1359 981"> <thead> <tr> <th colspan="2">Температура Кюри</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Железо (99% Fe)</td> <td>780 °C</td> </tr> <tr> <td>Никель (Ni)</td> <td>350 °C</td> </tr> <tr> <td>Кобальт (Co)</td> <td>1150 °C</td> </tr> <tr> <td>Пермаллой (Fe - 16%, Ni - 78%, Mo - 3,8%)</td> <td>550 °C</td> </tr> </tbody> </table>	Температура Кюри		Железо (99% Fe)	780 °C	Никель (Ni)	350 °C	Кобальт (Co)	1150 °C	Пермаллой (Fe - 16%, Ni - 78%, Mo - 3,8%)	550 °C
Температура Кюри												
Железо (99% Fe)	780 °C											
Никель (Ni)	350 °C											
Кобальт (Co)	1150 °C											
Пермаллой (Fe - 16%, Ni - 78%, Mo - 3,8%)	550 °C											
<p>У диамагнетиков магнитная проницаемость <math>\mu</math> всегда чуть меньше единицы <math>\mu &lt; 1</math></p> <p>Вода: <math>\mu = 0.999991</math> Золото: <math>\mu = 0.999963</math> Медь: <math>\mu = 0.9999912</math></p>	<p>У парамагнетиков магнитная проницаемость <math>\mu</math> всегда чуть больше единицы <math>\mu &gt; 1</math></p> <p>Воздух: <math>\mu = 1.00000038</math> Платина: <math>\mu = 1.000360</math> Алюминий: <math>\mu = 1.000023</math></p>	<p>У ферромагнетиков магнитная проницаемость <math>\mu</math> всегда много больше единицы <math>\mu \gg 1</math></p> <p>Железо <math>\mu = 24000</math> Никель <math>\mu = 1120</math> Кобальт <math>\mu = 175</math> Супермаллой <math>\mu = 100000</math></p>										

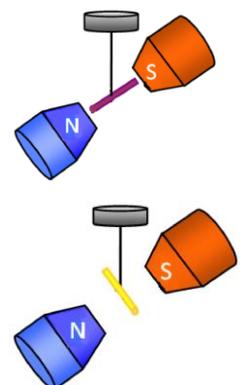
Если взять стерженьки из парамагнетика и диамагнетика, подвесить их на нити и поднести к магниту, то парамагнитный или ферромагнитный стерженьки будут притягиваться к магниту, причём парамагнитный будет слабо притягиваться к магниту, а ферромагнитный сильно.

Если взять стержёнок из диамагнетика, подвесить его на нити и поднести к магниту, то он будет с небольшой силой отталкиваться от магнита

Если взять стерженьки из парамагнетика, ферромагнетика и диамагнетика, подвесить их на нити или поставить на остриё иглы, и внести в поле между двумя полюсами магнита, то поведут они себя тоже по-разному.

Парамагнитный и ферромагнитный стерженьки, концы которых будут притягиваться к полюсам магнита, расположатся вдоль силовых линий поля – от полюса к полюсу.

Диамагнитный же стержёнок, концы которых будут отталкиваться от полюсов магнита, установятся перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.



Отсюда и названия этих магнетиков: «пара» по-гречески означает «вдоль», а «диа» означает «поперёк».

Число диамагнетиков огромно: йод, воск, слоновая кость, баранина вяленая, говядина вяленая, говядина свежая, кровь свежая, кровь высушенная, хлеб, древесный уголь... этот список можно перечислять очень долго. Даже сам человек – тоже диамагнетик.

«Если бы можно было подвесить человека на достаточно чувствительный подвес, – писал Фарадей, – и поместить в магнитное поле, то он расположился бы поперек силовых линий, так как все вещества, из которых он составлен, включая кровь, обладают этим свойством».

Чтобы подчеркнуть, насколько всеобъемлющ диамагнетизм, говорят, что все вещества в природе – диамагнетики; как исключение из правила встречаются парамагнетики, и совсем уж редко – ферромагнетики.



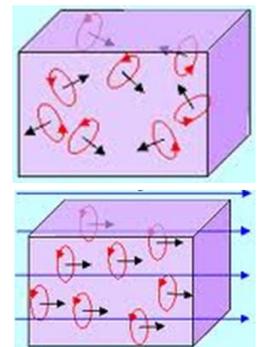
### Гипотеза Ампера

Причина вследствие которой тела обладают магнитными свойствами была впервые предложена французским ученым **Анри Ампером**:

*магнитные свойства вещества можно объяснить циркулирующими внутри него замкнутыми электрическими токами.*

Согласно гипотезе Ампера внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи. Они образованы движущимися вокруг ядра атома электронами.

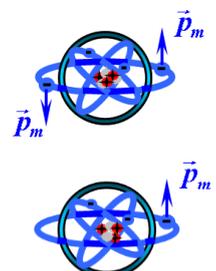
Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены беспорядочно по отношению друг к другу вследствие теплового движения, то их действия взаимно компенсируются и тело не обнаруживает магнитных свойств.



Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены так, что их действия складываются, то тело проявляет свои магнитные свойства.

По современным представлениям электроны в атомах движутся не по круговым орбитам, а их движение больше напоминает стоячие волны и их магнитные свойства обусловлены не круговыми движениями электронов вокруг ядра атома, а существованием у электронов (как и у большинства элементарных частиц) собственного магнитного поля.

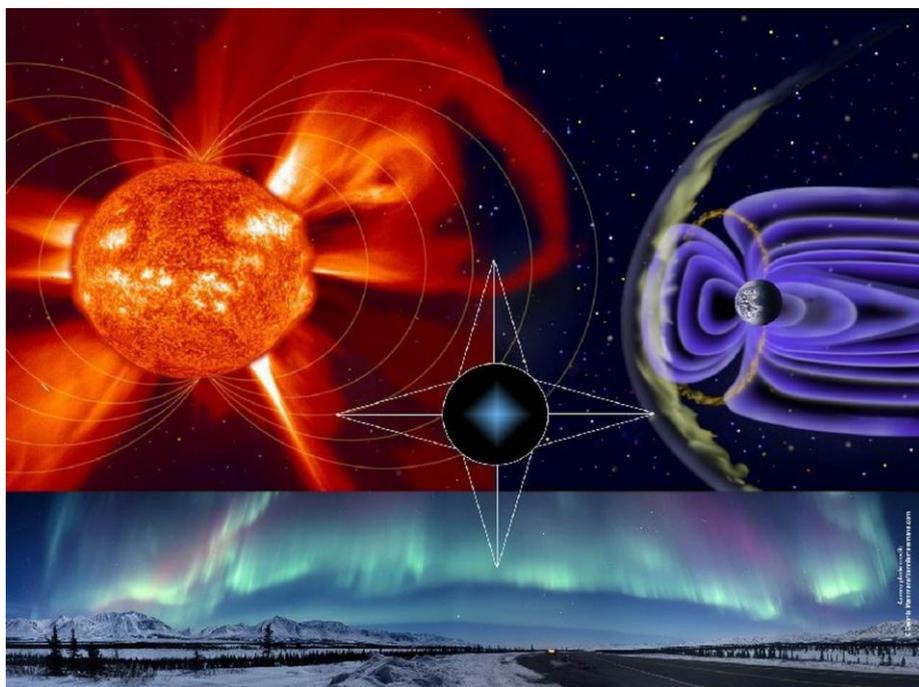
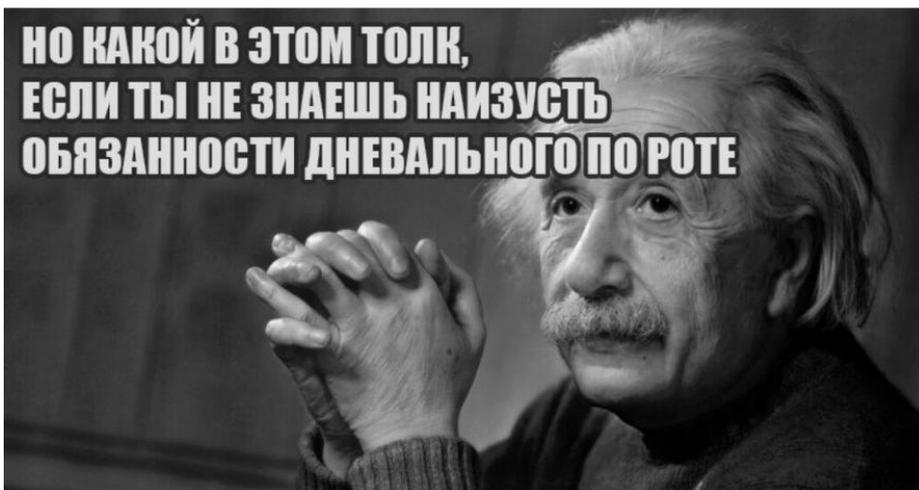
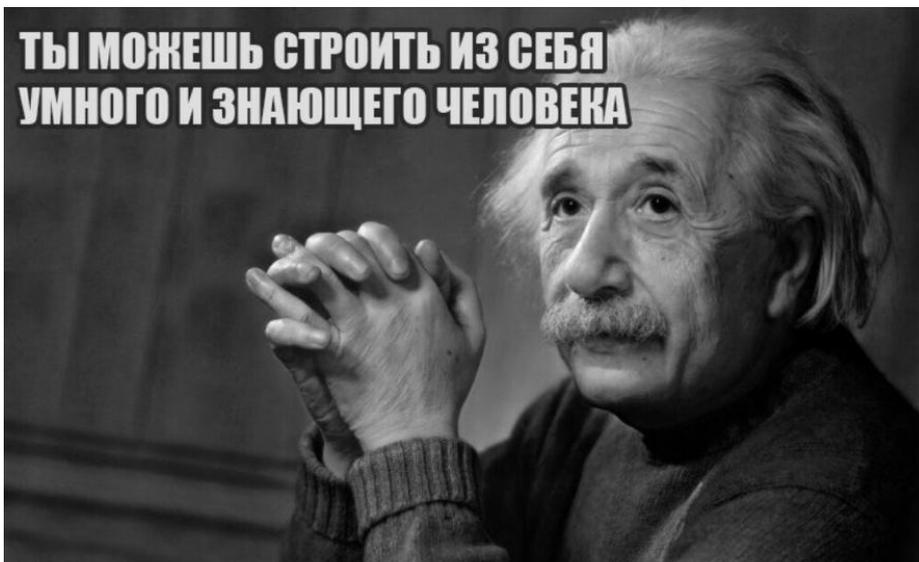
Если собственное магнитное поле всех электронов атома скомпенсировано, то такие атомы являются диамагнетиками.



Если собственное магнитное поле всех электронов атома не скомпенсировано, то такие атомы являются парамагнетиками или ферромагнетиками.

При помещении парамагнетика во внешнее магнитное поле электроны атома начинают ориентироваться так, что их магнитные поля начинают совпадать с направлением внешнего магнитного поля. В результате этого магнитное поле внутри парамагнетика слегка увеличивается.

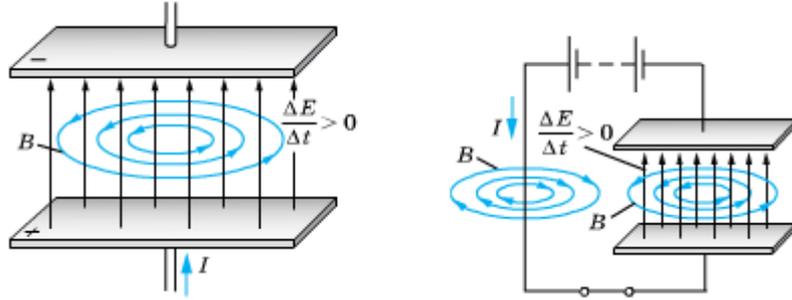
Нагревание парамагнетика приводит к дезориентации спинов и уменьшению собственного магнитного поля, а следовательно к уменьшению его магнитной проницаемости  $\mu$ .



## Ток смещения

Рассмотрим конденсатор в цепи постоянного и переменного тока. Наблюдения показывают, что:

1. - постоянный ток конденсатор не пропускает (то есть ток в цепи отсутствует),  
- переменный ток конденсатор пропускает (то есть ток в цепи существует).
2. Во время перезарядки конденсатора одинаковое по величине магнитное поле существует не только вокруг подводящих ток проводов, но и вокруг конденсатора, где тока проводимости нет.



Что является источником этого поля? Максвелл предложил следующее объяснение: *если между обкладками конденсатора находится диэлектрик, то при перезарядке конденсатора под действием электрического поля происходит смещение связанных с атомом электрических зарядов (электронов), которое можно рассматривать как своеобразный электрический ток, который Максвелл назвал **током смещения**.*

Математические вычисления показывают, что плотность тока смещения можно определить по формуле

$$\vec{j}_{\text{смещ}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

где  $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$  - вектор электрического смещения,

а  $\vec{P}$  - вектор поляризованности диэлектрика.

Таким образом, **плотность тока смещения** – это частная производная вектора электрического смещения по времени.  
(то есть, в любой точке пространства, где изменяется электрическое поле, существует ток смещения, который создаёт вокруг себя магнитное поле)

По своей физической природе **ток смещения в вакууме** – это изменяющееся со временем переменное электрическое поле. Током его назвали потому, что:

1. как и ток проводимости изменяющееся во времени электрическое поле создаёт вокруг себя магнитное поле,
2. имеет размерность тока.



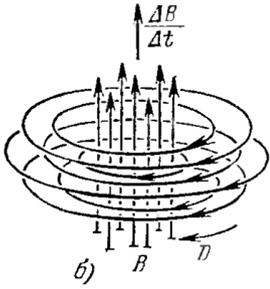
На вершине этой горы лежит твой диплом

## Уравнения Максвелла

Уравнения Максвелла играют в электродинамике покоящихся сред такую же роль, как и три закона Ньютона в механике или три начала в термодинамике.

Различают уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах.

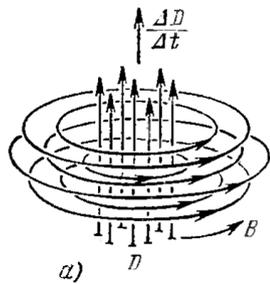
### Уравнения Максвелла в интегральной форме (или полевые уравнения Максвелла)



1. Циркуляция вектора  $\vec{E}$  вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  равна потоку вектора  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  через поверхность  $S$ , охватывающую этот контур, взятому с противоположным знаком, то есть

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

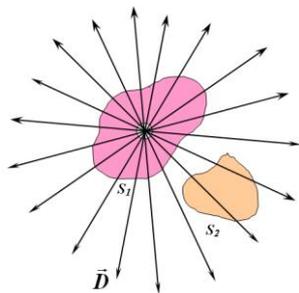
**физический смысл первого уравнения Максвелла:** оно говорит о том, что переменное магнитное поле порождает вокруг себя вихревое электрическое поле.



2. Циркуляция вектора  $\vec{H}$  вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  равна потоку вектора  $\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  через поверхность  $S$ , охватывающую этот контур, то есть

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

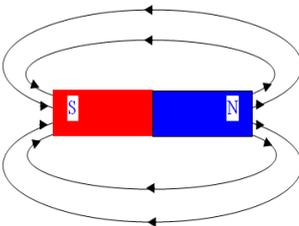
**физический смысл второго уравнения Максвелла:** оно говорит о том, что магнитное поле создаётся не только токами проводимости, но и изменяющимся во времени электрическим полем.



3. Поток вектора  $\vec{D}$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , равен алгебраической сумме свободных электрических зарядов, находящихся внутри этой поверхности, то есть

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

**физический смысл третьего уравнения Максвелла:** оно показывает, что источником электростатического поля являются свободные электрические заряды.



4. Поток вектора  $\vec{B}$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , равен нулю, то есть

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

**физический смысл четвёртого уравнения Максвелла:** оно показывает, что в природе не существует магнитных зарядов.

Это фундаментальные уравнения теории электромагнитного поля.

Из анализа 1-го и 2-го уравнений

Максвелла следует, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое, а переменное электрическое поле порождает магнитное, то есть переменные электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом и являются просто проявлениями единого электромагнитного поля.

Из четырёх уравнений Максвелла два векторных и два скалярных. Так как каждое векторное уравнение эквивалентно трём скалярным, то всего получается  $3+3+2=8$  уравнений с 12-тью неизвестными. Поэтому, чтобы систему уравнений можно было решить, её дополняют, так называемыми, **материальными уравнениями**, которые учитывают свойства окружающей токи и заряды среды.

В случае однородной несегнетоэлектрической и неферромагнитной среды материальные уравнения имеют вид

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}, \quad \vec{j} = \sigma\vec{E}.$$

В этих уравнениях:

- поляризованность среды учитывает диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon$  (эпсилон),
- намагниченность среды учитывает магнитная проницаемость среды  $\mu$  (мю),
- проводящие свойства среды учитывает удельная проводимость среды  $\sigma$  (сигма).

Чтобы система уравнений Максвелла имела единственное решение, к ним необходимо ещё добавить начальные условия и условия на границе раздела сред (граничные условия):

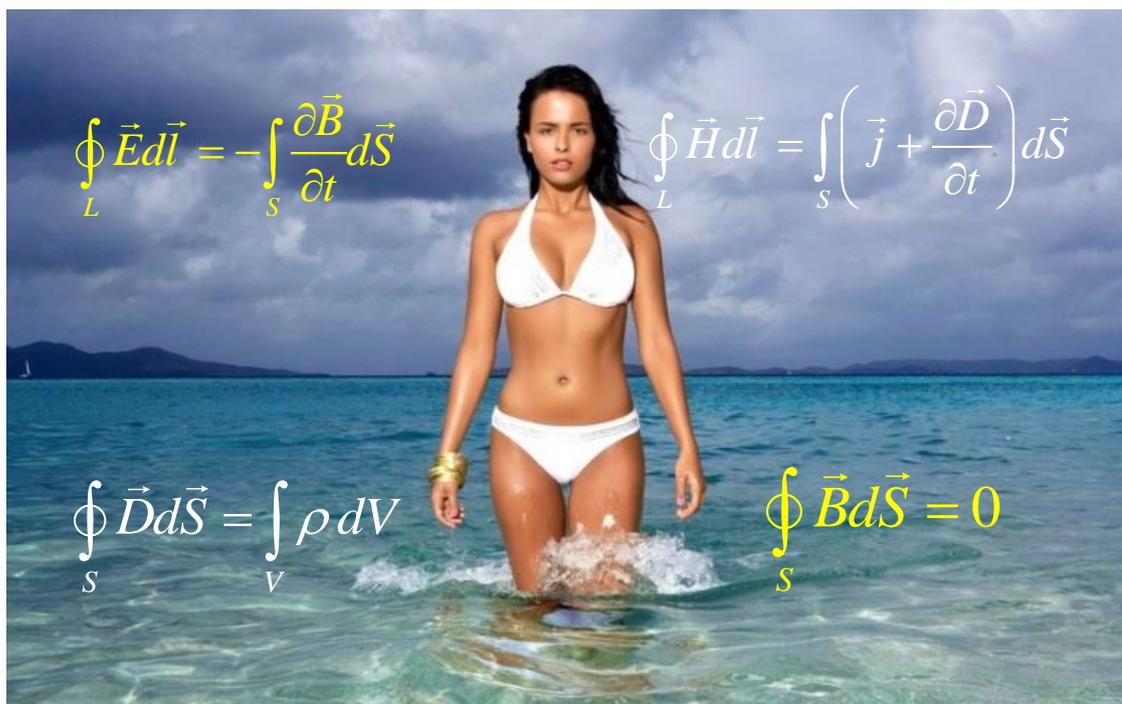
$$\begin{aligned} D_{2n} - D_{1n} &= \sigma, & E_{2\tau} - E_{1\tau} &= 0 \\ H_{2\tau} - H_{1\tau} &= j_N^{\text{поверх}}, & B_{2n} - B_{1n} &= 0, \end{aligned}$$

где  $\sigma$  - поверхностная плотность свободных зарядов в рассматриваемой точке  $M$ ,

$\vec{n}$  - единичный вектор нормали в точке  $M$ , проведённый из среды 1 в 2,

$\vec{\tau}$  - единичный вектор касательной к поверхности раздела в точке  $M$ ,

$\vec{j}_N^{\text{поверх}}$  - вектор поверхностной плотности тока проводимости в точке  $M$ .



**А ты знаешь уравнения Максвелла?**

### Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме можно получить из интегральных уравнений с помощью двух теорем векторного анализа:

1. **Теоремы Гаусса:** Поток вектора  $\vec{A}$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , равен дивергенции этого вектора  $div \vec{A}$  по объёму этой поверхности  $V$ :

$$\oint_S \vec{A} d\vec{S} = \int_V div \vec{A} dV,$$

где  $div \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$  - **дивергенция вектора  $\vec{A}$**  (это математический оператор)/

То есть дивергенция какого-либо вектора  $div \vec{A}$  представляет собой сумму частных производных соответствующих компонент этого вектора  $\vec{A}$  по координатам  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Смысл этой теоремы в том, что поток любого произвольного вектора  $\vec{A}$  можно при необходимости заменить интегралом по объёму дивергенции этого вектора.

2. **Теоремы Стокса:** Циркуляция вектора  $\vec{A}$  вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  равна потоку ротора вектора  $\vec{A}$  через поверхность  $S$ , охватывающую этот контур:

$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \oint_S rot \vec{A} d\vec{S},$$

где  $rot \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$  - **ротор вектора  $\vec{A}$**  (это математический оператор).

То есть какого-либо вектора  $rot \vec{A}$  представляет собой определитель второго порядка частных производных соответствующих компонент вектора  $\vec{A}$  по координатам  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Смысл этой теоремы в том, что циркуляцию любого произвольного вектора  $\vec{A}$  можно при необходимости заменить потоком ротора этого вектора.

Так вот, после некоторых математических преобразований уравнений Максвелла в интегральной форме можно получить следующие уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} 1. \quad rot \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & 2. \quad rot \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ 3. \quad div \vec{D} &= \rho & 4. \quad div \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

Теория Максвелла объяснила все известные в то время экспериментальные факты и предсказала ряд новых явлений. Основным следствием теории Максвелла был вывод о существовании электромагнитных волн, распространяющихся со скоростью света, а теоретическое исследование свойств этих волн привело Максвелла к созданию **электромагнитной теории света**.

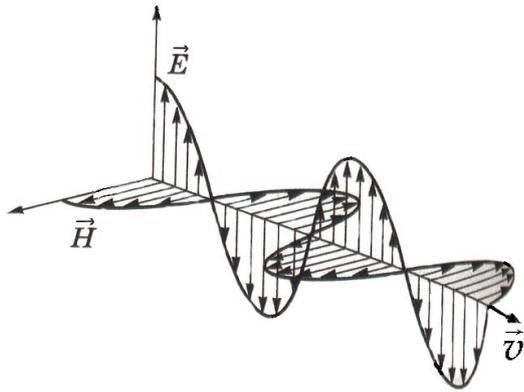
Надо сказать, что никто этих волн до Максвелла не видел, никто даже не подозревал, что такие волны могут существовать. Но лишь через двадцать лет после того, как это предсказание было сделано, их наконец-то экспериментально обнаружили, что явилось настоящим триумфом этой теории.

## Электромагнитные волны

Существуют уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме. До момента формулировки этих уравнений люди были знакомы только с механическими волнами (звук, морские волны, сейсмические волны и т.п.).

Однако, из решений уравнений Максвелла следует вывод о существовании в природе ещё одного типа волн, которые назвали *электромагнитными волнами*.

Из этой теории следует, что в электромагнитной волне переменное вихревое электрическое поле создаёт вокруг себя переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, создаёт переменное вихревое электрическое поле и так далее. В результате чего, «цепляясь» друг за друга, эти поля способны перемещаться в пространстве, образуя единую электромагнитную волну.



Из решений уравнений Максвелла в дифференциальной форме следует, что в монохроматической плоской электромагнитной волне вектора напряжённости электрического поля  $\vec{E}$  и напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  колеблются в одинаковых фазах во взаимно перпендикулярных плоскостях и одновременно перпендикулярно вектору скорости  $\vec{v}$  распространения волны (см. рис. 1).

Причём

**Рис. 1** Распределение проекций векторов  $E$  и  $H$  в электромагнитной волне по направлению её распространения

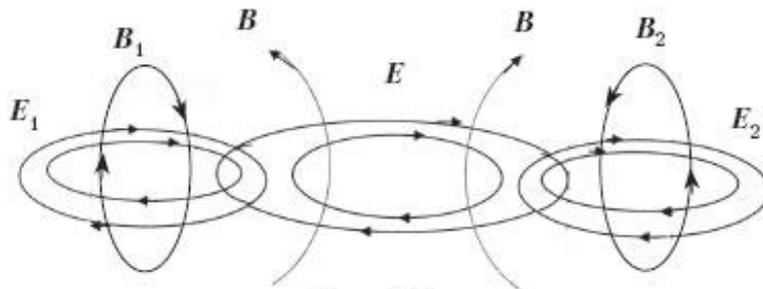
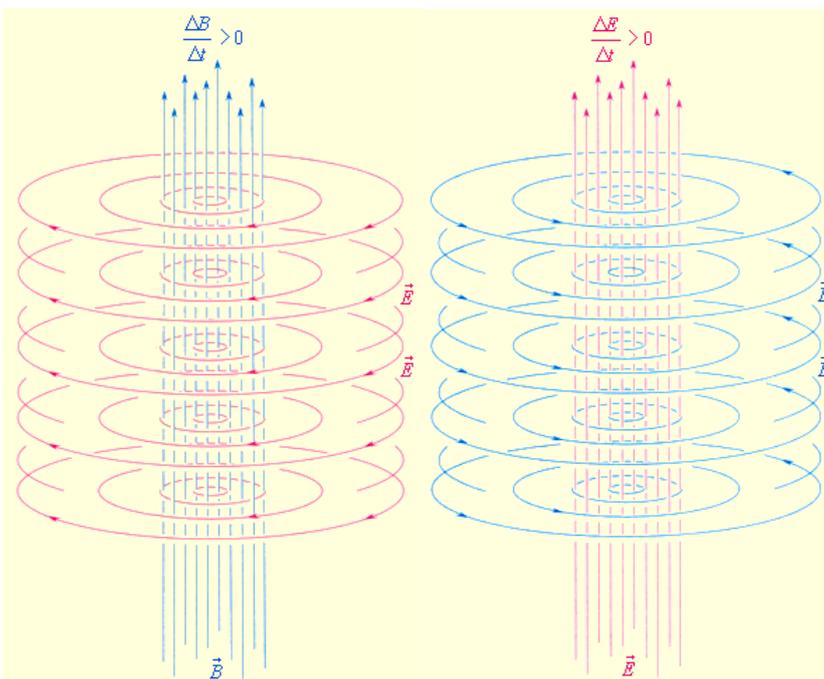
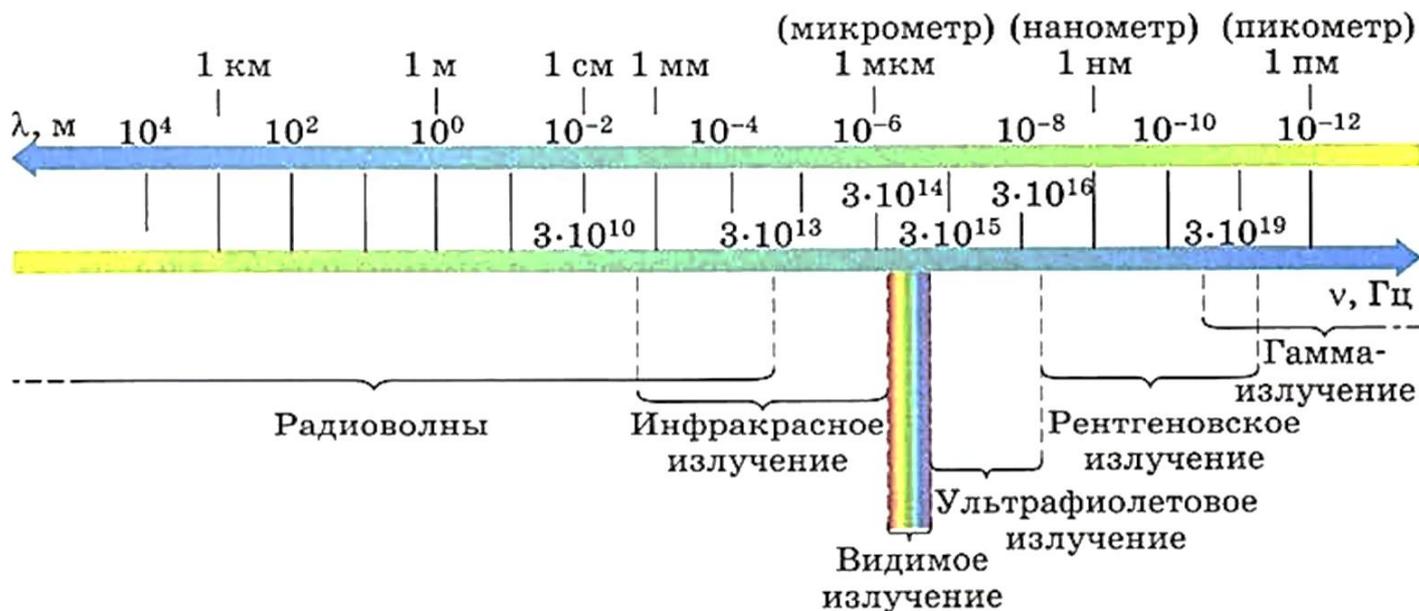


Рис. 4.24



Настройка электромагнитных волн

## Шкала электромагнитных волн



К электромагнитным волнам относятся:

1. гамма-излучение - электромагнитные волны с длиной

$$10^{-13} \text{ м} < \lambda < 10^{-10} \text{ м},$$

2. рентгеновское излучение - электромагнитные волны с длиной

$$10^{-10} \text{ м} < \lambda < 10^{-8} \text{ м},$$

3. ультрафиолетовое излучение - электромагнитные волны с длиной

$$10^{-8} \text{ м} < \lambda < 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

4. свет - электромагнитные волны с длиной

$$0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < 0,76 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

5. инфракрасное излучение - электромагнитные волны с длиной

$$0,76 \cdot 10^{-6} \text{ м} < \lambda < 10^{-3} \text{ м},$$

6. радиоволны - электромагнитные волны с длиной  $\lambda > 10^{-3} \text{ м}$ .

Ультрафиолетовое излучение применяют: 1) для научных исследований электронной структуры атомов и молекул с использованием спектров; 2) для исследования по спектрам космических объектов и проходящих в них изменений; 3) для обнаружения вредных примесей в атмосфере; 4) для создания ламп и светящихся красок.

Инфракрасное излучение применяют: 1) для научных исследований структуры электронных оболочек атомов и строения молекул; 2) при фотографировании для уточнения деталей изучаемого объекта; 3) для сушки и нагрева материалов; 4) в приборах ночного видения; 5) в инфракрасных лазерах для наземной и космической связи.

## Свет и цвет

В природе нет цветов. Цвет – это результат психофизического восприятия электромагнитных волн определённой частоты органами зрения человека и других животных.

Монохроматический свет разных цветов отличается частотой электромагнитной волны.

Разные животные по-разному видят окружающий мир, так как воспринимают разные диапазоны электромагнитного излучения.

Так, например, змеи видят инфракрасное излучение, что помогает им охотиться даже ночью.

Пчёлы видят ультрафиолетовое излучение и способны различать различные виды поляризованного света.

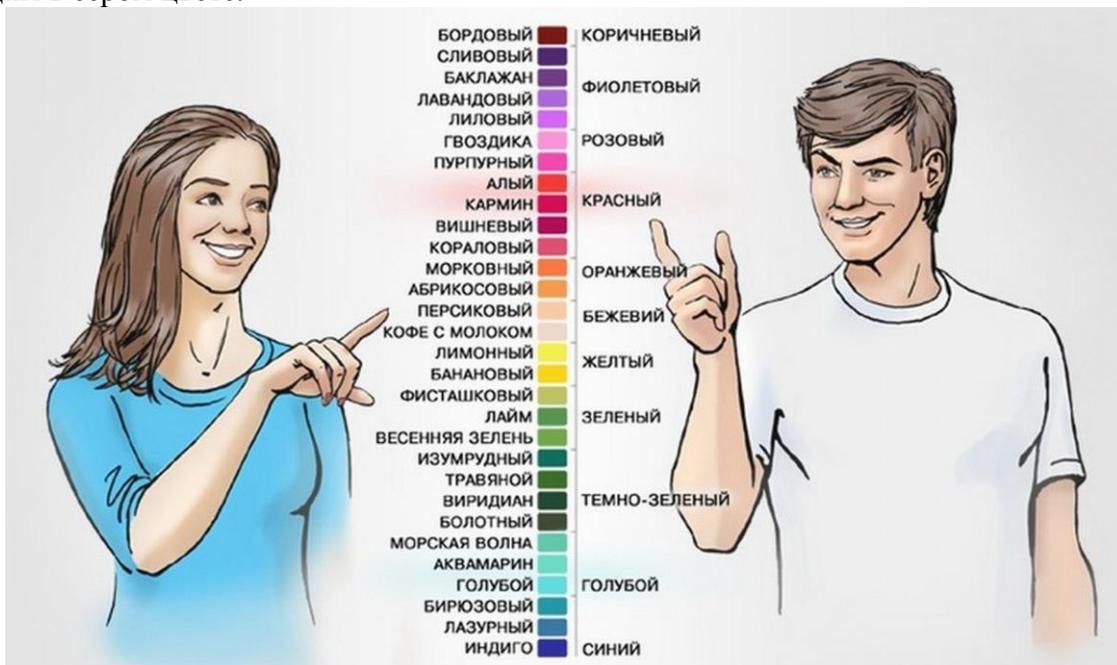
У человека есть дневное (цветное) зрение и ночное (чёрно-белое) зрение.

Это объясняется наличием на сетчатке глаза человека двух видов светочувствительных клеток: колбочек и палочек.

Колбочки менее чувствительные и отвечают за цветное зрение.

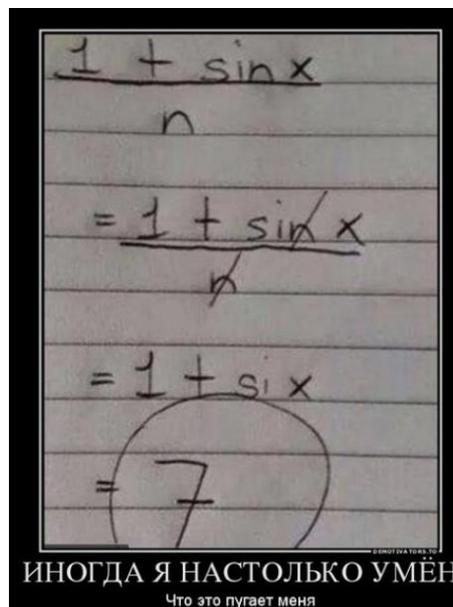
Палочки более чувствительные и отвечают за чёрно-белое зрение.

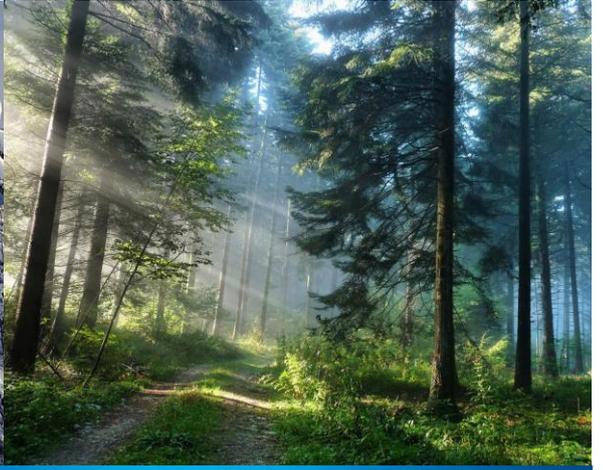
При слабом освещении колбочки отключаются и в работу включаются палочки, поэтому в темноте мы всё видим в сером цвете.



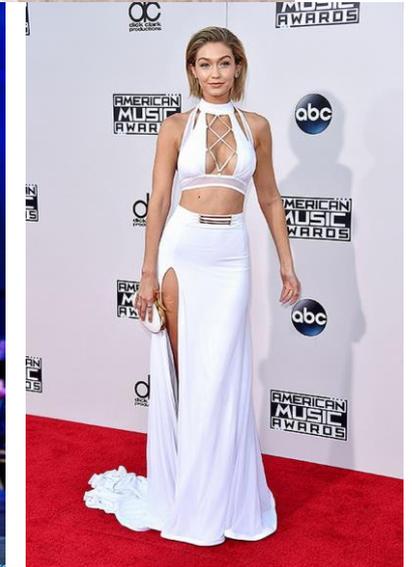
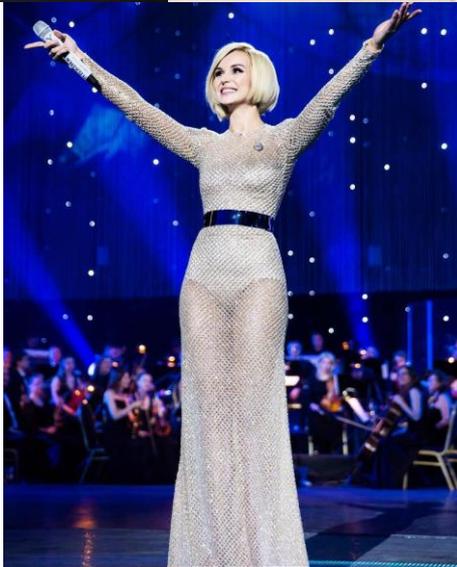
Мужчины и женщины по-разному различают цвета.

Женщины видят больше оттенков, чем мужчины





СТРАНИЧКА КРАСОТЫ



<http://class-fizika.narod.ru/vid.htm> видеодемонстрации

http://class-fizika.narod.ru/vid.htm

Рекомендуемые сайты Дополнительные над...

ies Ex-Wife for havi... Видеоуроки по физи... Демонстрационные табл...

Видеоролик - анимация "Силловые линии магнитного поля тока"  
 Видеоролик "Электромагнитный кран"  
 Видеоролик "Действие магнитного поля на ток"  
 Видеоролик - анимация "Направление силы ампера по правилу левой руки"  
 Видеоролик "Опыт Ампера"  
 Видеоролик - анимация "Электродвигатель"  
 Анимация "Намагничивание ферромагнетика"  
 Видеоролик "Защита от размагничивания"  
 Видеоролик "Намагничивание стальной проволоки"  
 Видеоролик "Применение магнитного поля в дефектоскопии"  
 Анимация "Действие Солнечного ветра на магнитное поле Земли"  
 Анимация "Солнечное излучение и магнитное поле Земли"  
 Видеоролик - анимация "Гипотеза возникновения магнитного поля Земли"  
 Видеоролик - анимация "Магнитное поле Земли"

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Видеоролик "Явление электромагнитной индукции"  
 Видеоролик "Явление электромагнитной индукции" (опыт Фарадея)  
 Видеоролик - анимация "Явление электромагнитной индукции"  
 Видеоролик "Зависимость индукционного тока от скорости изменения магнитного потока"  
 Анимация "Работа ЭЛТ"  
 Видеоролик - анимация "Получение индукционного тока"  
 Видеоролик "Генератор переменного тока"  
 Видеоролик - анимация "Высоковольтный генератор"  
 Видеоролик - анимация "Получение переменного индукционного тока"  
 Видеоролик "Нагревание воды с помощью трансформатора"  
 Видеоролик "Принцип действия трансформатора"  
 Видеоролик "Трансформатор"

<http://techlibrary.ru/books.htm> учебная литература

← ↻ 🔍 techlibrary.ru

Алфавитный каталог

Алфавитный каталог

- Абагян Л.П., Базаянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты. 1981.djvu - [9,976,859 байт](#)
- Абаимов С.Г. Статистическая физика сложных систем. От фракталов до скейлинг-поведения. 2012.djvu - [2,477,345 байт](#)
- Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясневич И.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. 1997.djvu - [3,211,005 байт](#)
- Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. 1979.djvu - [4,946,267 байт](#)
- Абаренков И.В., Брагцев В.Ф., Тулуб А.В. Начала квантовой химии. 1989.djvu - [3,367,781 байт](#)
- Абаренков И.В., Загуляев С.Н. Простейшие модели в квантовой механике. 2004.djvu - [958,524 байт](#)
- Абаринов А.А. Составление детализированных чертежей металлических конструкций. 1977.djvu - [4,869,648 байт](#)
- Абаффи Й., Спедикаго Э. Магематические методы для линейных и нелинейных уравнений. Проекционные ABS-алгоритмы. 1996.djvu - [2,378,952 байт](#)
- Абашкин С.Н. и др. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии. 1982.djvu - [13,118,080 байт](#)
- Аббасов И.Б. Пирамида. Методические указания к домашней работе. 1999.pdf - [405,975 байт](#)
- Аббасов И.Б., Основин В.М. Методические указания по выполнению чертежей с надписями. 2001.pdf - [485,811 байт](#)
- Абдильдин М.М. Механика теории гравитации Эйнштейна. 1988.djvu - [5,034,537 байт](#)
- Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. 1985.djvu - [3,314,906 байт](#)
- Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчётам. 1970.djvu - [11,401,747 байт](#)
- Абельсон И.Б. Максимум и минимум. 1935.djvu - [2,288,830 байт](#)
- Абельсон И.Б. Рождение логарифмов. 1948.djvu - [4,679,232 байт](#)
- Аберкромби Д. и др. Аффинная хромоаграфия. 1988.djvu - [7,826,000 байт](#)
- Абжандадзе З.Л., Осипов В.Ф. Преобразование Фурье-Френеля и некоторые его приложения. 2000.pdf - [26,574,226 байт](#)
- Абнани В.Х. Теория авиационных и газовых турбин. 1953.djvu - [4,042,889 байт](#)



# EqWorld

## МИР МАТЕМАТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

### Начальная стр.

#### Точные решения

Алгебраические ур-я  
Обыкновенные ДУ  
Системы ОДУ  
УрЧП 1-го порядка  
Линейные УрЧП  
Нелинейные УрЧП  
Системы УрЧП  
УрЧП с запазд. аргум.  
Интегральные ур-ния  
Функциональные ур-я  
Указатель уравнений  
EqArchive  
Справочники  
Интересные статьи

#### Методы решения

Алгебраические ур-я  
Диофантовы ур-ния  
Обыкновенные ДУ  
УрЧП  
Интегральные ур-ния  
Функциональные ур-я

#### Мат. форумы

Форум EqWorld  
Другие форумы

#### Вспом. разделы

Интегралы  
Спец. функции  
Интеграл. преобраз.

#### Программы

Maple  
Mathematica  
MATLAB  
Другие

#### Образование

Алгебраические ур-я

Точные решения    Методы решения    Библиотека    Мат. форумы

Библиотека > Книги по физике

Поиск в библиотеке по авторам и ключевым словам из названия книги:

### Учебники и другие книги по физике

- Элементарная и популярная физика
- Общая физика (учебники, курсы лекций, задачки, справочники)
- Молекулярная физика, термодинамика, теория горения
- Статистическая физика
- Акустика, теория звука
- Колебания, волны и дифракция
- Оптика
- Электричество, магнетизм, электродинамика
- Физика плазмы
- Общая и специальная теория относительности, гравитация
- Квантовая механика, квантовая физика
- Атомная и ядерная физика
- Астрономия, астрофизика и космология
- Физика твердого тела
- Другие книги по физике



### Вопрос на экзамене:

— Почему Земля крутится?

### Ответ:

— Ей придают крутящий момент вращающиеся в гробах великие физики во время вступительных экзаменов.

Хочешь увидеть такую зиму? Завали сессию!!!