

# VI. Электростатика

## 1. Закон Кулона

**Сила** — электростатического взаимодействия **точечных** зарядов  $q_1$  и  $q_2$

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

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — **электрическая постоянная**

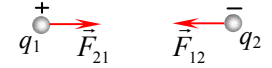
$r$  — расстояние между зарядами  $q_1$  и  $q_2$

**Точечными** считаются заряженные тела, размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними.

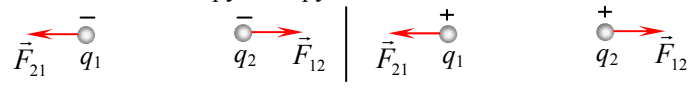
$\epsilon$  — **диэлектрическая проницаемость** среды, в которой находятся заряды  $q_1$  и  $q_2$  (полагается, что среда — безграничный, однородный диэлектрик)

$$\epsilon_{\text{возд}} \approx \epsilon_{\text{вакуума}} = 1$$

**Заряды противоположных знаков ("разноименные") притягиваются друг к другу:**



**Заряды одинаковых знаков ("одноименные") отталкиваются друг от друга:**



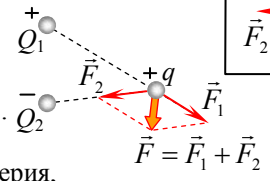
## 2. Принцип суперпозиции

Если на заряд  $q$  действуют несколько зарядов  $Q_1, Q_2, \dots$ , то:

$$\vec{F}_{\text{на } q} = \vec{F}_{\text{на } q}(Q_1) + \vec{F}_{\text{на } q}(Q_2) + \dots$$

Сила, действующая на заряд  $q$  со стороны системы зарядов  $Q_1, Q_2, \dots$

Сила, которая действовала бы на заряд  $q$  со стороны заряда  $Q_1$ , в отсутствие остальных зарядов  $Q_2, Q_3, \dots$



## 3. Электрическое поле

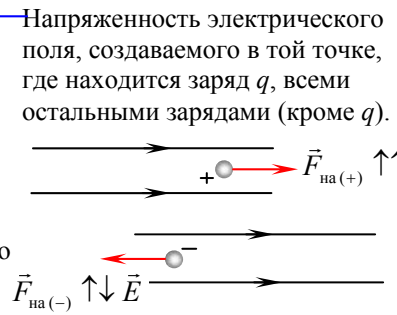
— особая материя, возникающая вокруг любых электрических зарядов и действующая электрической силой на любые электрические заряды, попавшие в это поле.

### Характеристики электрического поля

$\vec{E}$  — **напряженность** электрического поля — силовая характеристика поля. Напряженность численно равна силе, которая действовала бы на единицу пробного заряда, помещенного в данную точку поля.

$$\vec{F}_{\text{на } q}^{\text{эл}} = q\vec{E}$$

Электрическая сила, действующая на точечный заряд  $q$  со стороны электрического поля.



$\phi$  — **потенциал** электрического поля — энергетическая характеристика поля. Потенциал численно равен потенциальной энергии, которую имела бы единица пробного заряда, помещенного в данную точку поля.

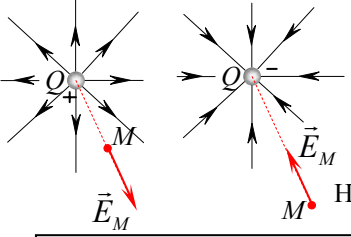
$$W = q \cdot \phi \Rightarrow$$

Потенциальная энергия заряда  $q$ , который находится в точке, где все остальные заряды (кроме  $q$ ) создают потенциал  $\phi$ .

$$A_{1-2}^{\text{эл. над } q} = q(\phi_1 - \phi_2)$$

Работа электрических сил над зарядом  $q$  при его перемещении из точки с потенциалом  $\phi_1$  в точку с потенциалом  $\phi_2$ . (потенциалы  $\phi_1$  и  $\phi_2$  создаются всеми зарядами, кроме  $q$ )

### 3.1. Напряженность и потенциал электрического поля, созданного одним точечным зарядом Q



$$E_M = k \frac{|Q|}{\epsilon r_M^2}$$

Напряженность электрического поля, созданного точечным зарядом  $Q$  в точке  $M$ , расположенной на расстоянии  $r_M$  от  $Q$ .

$$\phi_M = k \frac{Q}{\epsilon r_M}$$

$\phi = 0$  на  $\infty$

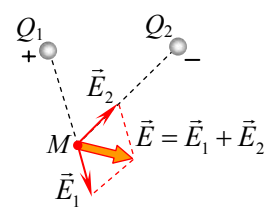
Потенциал электрического поля, созданного точечным зарядом  $Q$  в точке  $M$ , расположенной на расстоянии  $r_M$  от  $Q$ .

### 3.2. Напряженность и потенциал электрического поля, созданного системой точечных зарядов Q1, Q2, ...

$$\vec{E}_M = \vec{E}_M(Q_1) + \vec{E}_M(Q_2) + \dots$$

Напряженность электрического поля, созданного системой точечных зарядов  $Q_1, Q_2, \dots$  в точке  $M$

Напряженность электрического поля, которое создавал бы в точке  $M$  заряд  $Q_1$ , в отсутствие остальных зарядов  $Q_2, Q_3, \dots$

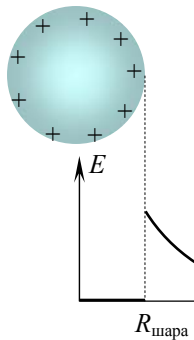


$$\phi_M = \phi_M(Q_1) + \phi_M(Q_2) + \dots$$

Потенциал электрического поля, созданного системой точечных зарядов  $Q_1, Q_2, \dots$  в точке  $M$

Потенциал электрического поля, которое создавал бы в точке  $M$  заряд  $Q_1$ , в отсутствие остальных зарядов  $Q_2, Q_3, \dots$

### 3.3. Напряженность и потенциал электрического поля, созданного равномерно заряженным по поверхности шаром



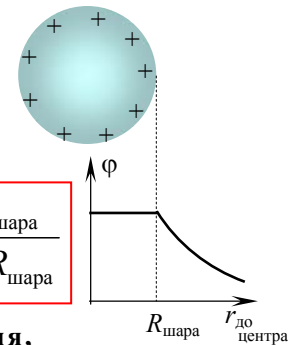
$$E_{\text{вне шара}} = k \frac{|Q_{\text{шара}}|}{\epsilon r_{\text{до центра шара}}^2}$$

$$E_{\text{внутри шара}} = 0$$

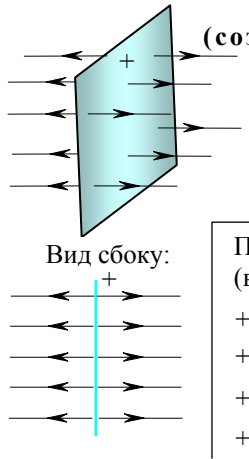
$$\Phi_{\text{вне шара}} = k \frac{Q_{\text{шара}}}{\epsilon r_{\text{до центра шара}}}$$

$$\Phi = 0 \text{ на } \infty$$

$$\Phi_{\text{внутри шара}} = \Phi_{\text{поверхн шара}} = \Phi_{\text{шара}} = k \frac{Q_{\text{шара}}}{\epsilon R_{\text{шара}}}$$



### 3.4. Напряженность и потенциал однородного электрического поля, (созданного равномерно заряженной плоскостью или плоским конденсатором)



$$E_{\text{плоск}} = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0\epsilon}$$

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

Поверхностная плотность заряда / Заряд поверхности площадью S

Плоский конденсатор (вид сбоку в разрезе)

$$E_{\text{конд}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$$

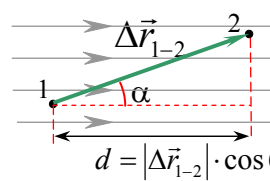
Для любого однородного электрического поля:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \vec{E} \cdot \Delta\vec{r}_{1-2} = E \cdot |\Delta\vec{r}_{1-2}| \cdot \cos\alpha = E_x \cdot \Delta x$$

Напряжение (разность потенциалов) между точками 1 и 2 в однородном электрическом поле.

При  $\vec{E} \parallel OX$  или  $\Delta\vec{r}_{1-2} \parallel OX$   
 $\Phi_1 - \Phi_2 = E_x(x_2 - x_1)$

$U = E \cdot d$  —  $d$  — проекция вектора  $\Delta\vec{r}_{1-2}$  на силовую линию.



### 4. Потенциальная энергия системы электрических зарядов

$$W_{\text{сист}} = W_{\text{внеш}} + W_{\text{взаим}}$$

Энергия взаимодействия зарядов системы друг с другом:  
 для системы из трех зарядов  $q_1, q_2$  и  $q_3$

$$W_{12}^{\text{вз}} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r_{12}}$$

для системы из двух зарядов  $q_1$  и  $q_2$

Энергия взаимодействия зарядов системы с внешним электрическим полем

$$W_{\text{внеш}} = q_1 \Phi_1^{\text{внеш}} + q_2 \Phi_2^{\text{внеш}} + \dots$$

$\Phi_i^{\text{внеш}}$  — потенциал внешнего электрического поля в той точке, где расположен заряд  $q_i$ .

$$W_{123}^{\text{вз}} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r_{12}} + k \frac{q_1 \cdot q_3}{\epsilon r_{13}} + k \frac{q_2 \cdot q_3}{\epsilon r_{23}}$$

$$W_{\text{вз}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \Phi_i^{\text{собст}}$$

$\Phi_i^{\text{собст}}$  — потенциал, создаваемый всеми зарядами системы, кроме  $q_i$ , в точке, где находится заряд  $q_i$ .

### 5. Емкость

Емкость уединенного проводника  $C_{\text{пров}} = \frac{q}{\Phi}$

заряд проводника / потенциал проводника относительно бесконечности

Заряд конденсатора (заряд его "+" - пластины)

$$C_{\text{конд}} = \frac{q}{U} = \frac{q_1}{\Phi_1 - \Phi_2}$$

Заряд пластины "1" / Разность потенциалов между пластинами "1" и "2"

$$C_{\text{плоского конденсатора}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$

Диэлектрическая проницаемость вещества между пластинами / Площадь пластины конденсатора

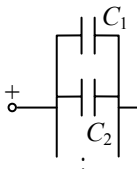
Емкость конденсатора

Напряжение на конденсаторе (разность потенциалов между "+" и "-" пластинами)  $U = E \cdot d$

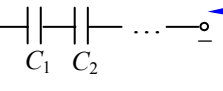
расстояние между пластинами конденсатора / Напряженность электрического поля между пластинами конденсатора

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

Энергия электрического поля конденсатора



Параллельное соединение конденсаторов (каждый конденсатор соединен одной пластиной с "+"-выходом системы, а другой пластиной с "-"-выходом)



Последовательное соединение конденсаторов (каждый конденсатор соединен одной пластиной с предыдущим, а другой пластиной с последующим конденсатором без ответвлений)

Общая емкость системы конденсаторов — емкость такого одного конденсатора, при включении которого вместо всей системы не изменятся напряжение между выходами ( $U_{\text{общ}}$ ) и общий заряд  $q_{\text{общ}}$

Параллельное:  $C_{\text{общ}}^{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots$ ,  $U_{\text{общ}}^{\text{пар}} = U_1 = U_2 = \dots$ ,  $q_{\text{общ}}^{\text{пар}} = q_1 + q_2 + \dots$

Последовательное:  $U_{\text{общ}}^{\text{посл}} = U_1 + U_2 + \dots$ ,  $q_{\text{общ}}^{\text{посл}} = q_1 = q_2 = \dots$ ,  $\frac{1}{C_{\text{общ}}^{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

### 6. Свойства проводника в электрическом поле

$\vec{E}_{\text{внутри проводника}} = 0$   $\Rightarrow$  Проводник эквипотенциален  $\Rightarrow$  Силовые линии входят в проводник и выходят из него перпендикулярно поверхности

Если в проводнике нет тока

Если проводник заряжен, то заряд распределен в бесконечно тонком слое на поверхности проводника. ( $\sigma$  максимальна на выпуклостях, особенно на остриях, и минимальна на вогнутых участках поверхности)