

# ЛЕКЦИЯ № 7 Основы электростатики

**Элементы содержания:** Электрический заряд и его свойства. Проводники и диэлектрики. Электростатическое взаимодействие. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Потенциал электростатического поля. Связь напряженности и потенциала. Электрическое поле в веществе. Емкость. Конденсатор. Энергия электрического поля.

Литература: Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2000. С. 128-154.



**Электрический заряд**  $q, Q$  – физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия,  $[q]=\text{Кл}$ .

### Свойства электрического заряда:

1. Различают **два вида** электрических зарядов (Шарль Дюфе, 1733 г.), условно называемых положительными и отрицательными. Разноименно заряженные тела притягиваются. Одноименно заряженные тела отталкиваются.

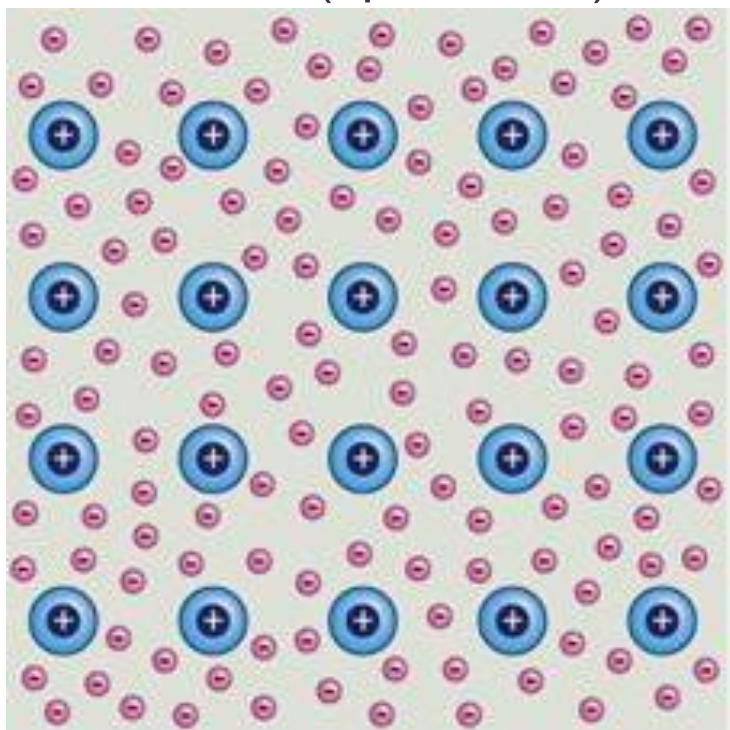
2. **Закон сохранения** заряда: в замкнутой (электрически изолированной) системе полный электрический заряд остается неизменным, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы (Майкл Фарадей, 1838 г.).

3. Электрический заряд **дискретен**: существует минимальный элементарный электрический заряд ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), которому кратны все электрические заряды тел (Джозеф Томсон, 1897 г.).

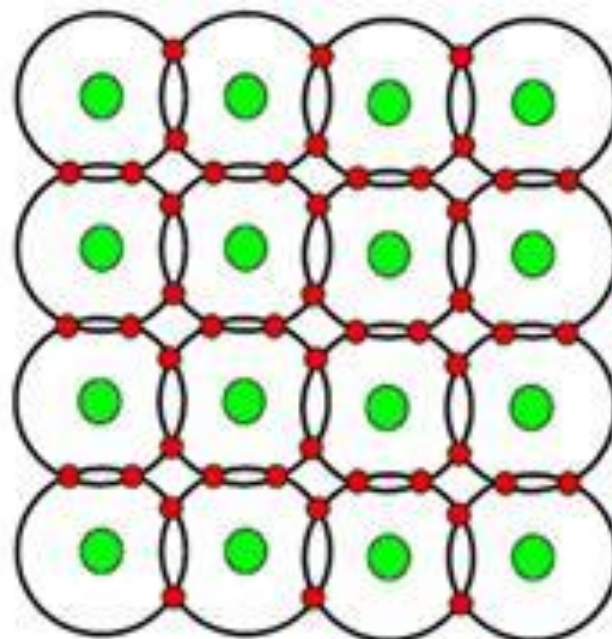
**Проводники** – тела, в которых электрические заряды могут свободно перемещаться на значительные расстояния.

**Диэлектрики** – тела, в которых заряды не могут перемещаться от одной части тела к другой (**связанные заряды**).

металл (проводник)



диэлектрик



**Физическая модель:** **точечный заряд** - электрически заряженное тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.

### Основной закон электростатики

**Закон Кулона** (Шарль Кулон, 1785 г.): сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными электрическими зарядами прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами:

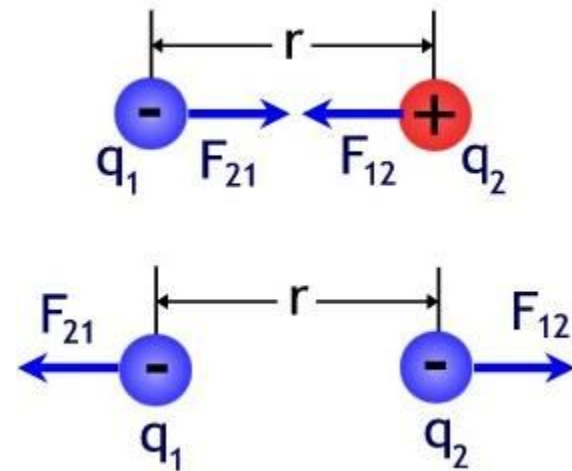
$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (7.1)$$

где  $k=9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$  - коэффициент пропорциональности;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества;

$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  - электрическая постоянная.

**Диэлектрическая проницаемость вещества** – величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данном веществе меньше силы взаимодействия между этими же зарядами, если бы они находились в вакууме.



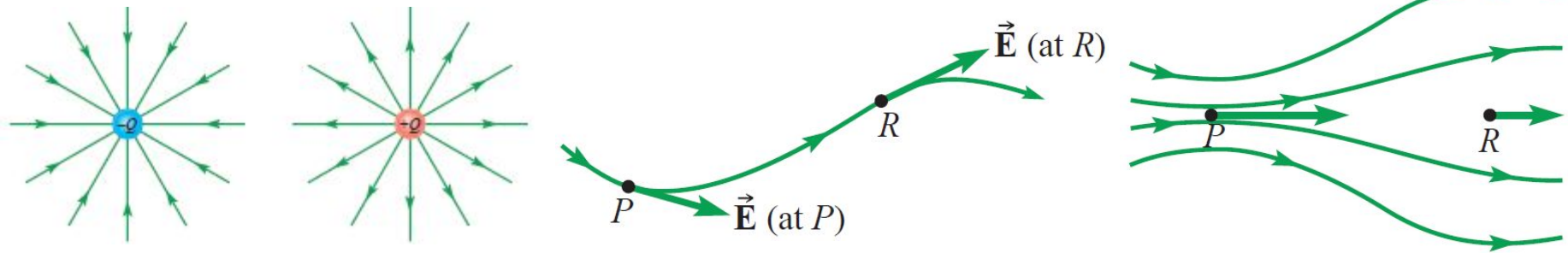
**Электрическое поле** – вид материи, посредством которого взаимодействуют электрические заряды.

**Напряженность электрического поля** – векторная величина, численно равная силе, действующей со стороны электрического поля на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля;  $[E] = \text{Н/Кл} = \text{В/м}$  :

$$\vec{E} = \vec{F}/q \quad . \quad (7.2)$$

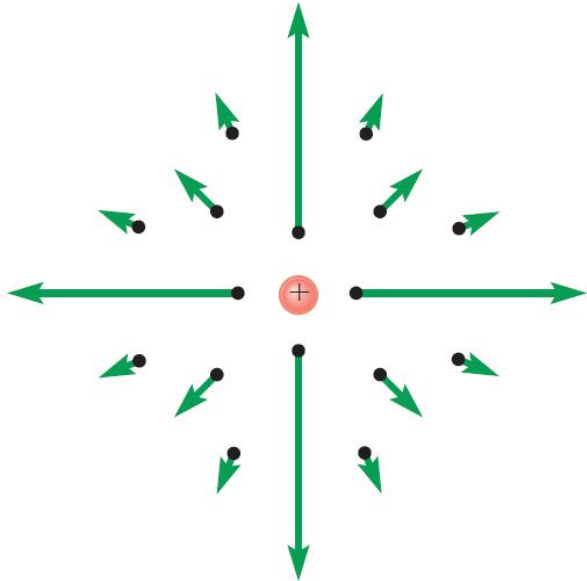
**Линии напряженности** – воображаемые линии, которые используют для графического изображения электрического поля и проводят в соответствии с тремя правилами:

- 1) линии выходят из положительных зарядов и входят в отрицательные заряды;
- 2) касательная к линиям в каждой точке пространства совпадает по направлению с вектором напряженности в этой точке;
- 3) густота линий определяет величину напряженности.



# Поле точечного заряда

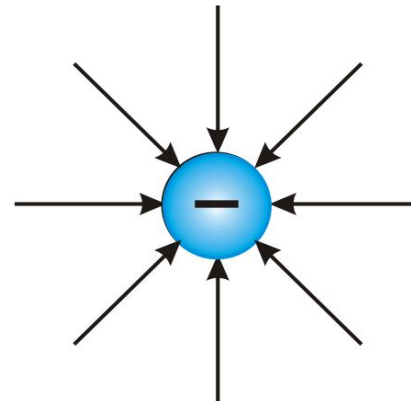
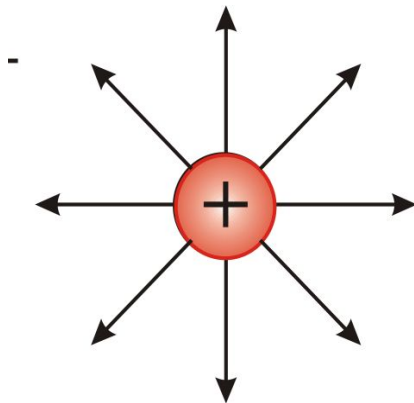
Физическая модель: точечный заряд - электрически заряженное тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.



Напряженность поля:

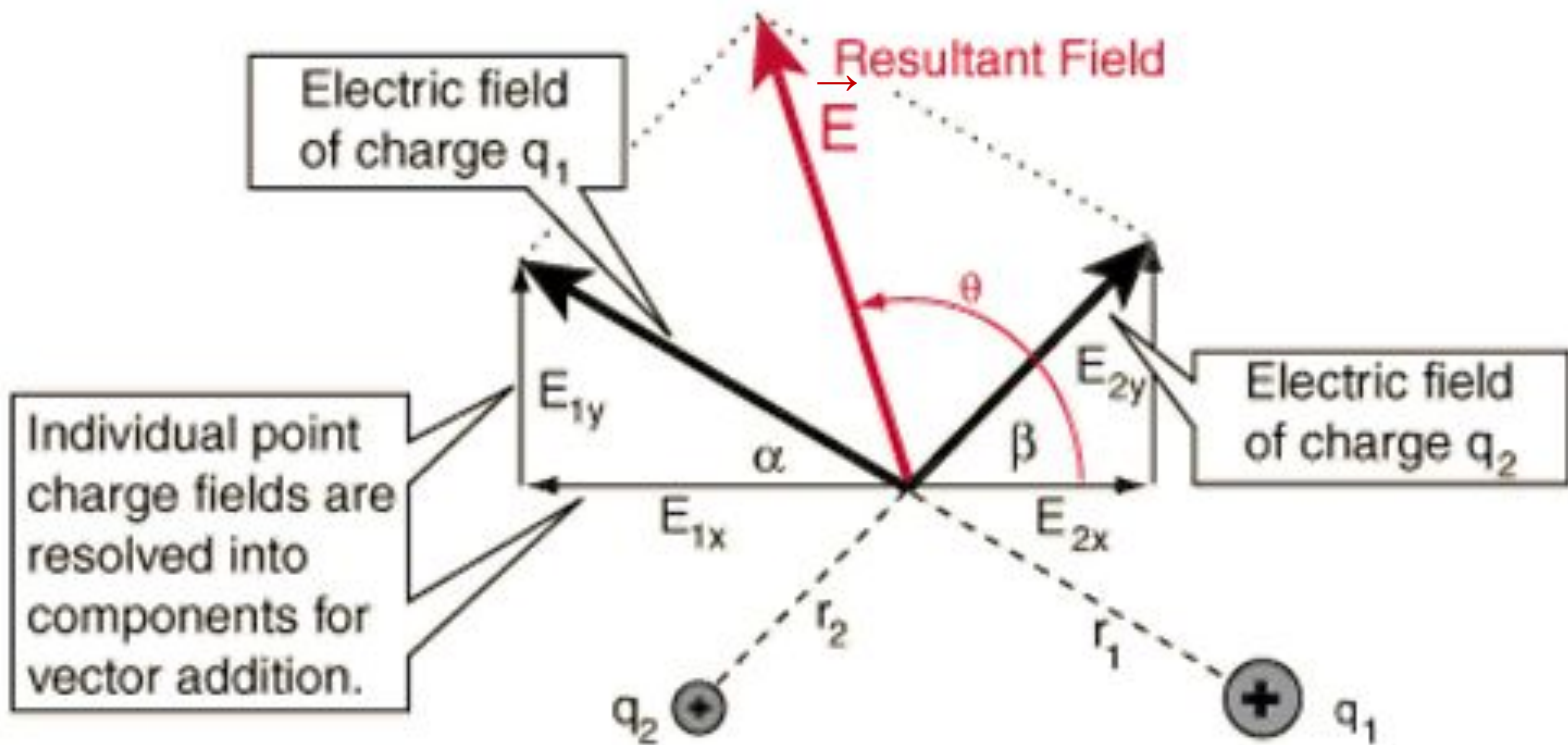
$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{\epsilon r^2} \\ E &= \frac{F}{q} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon r^2} . \quad (7.3)$$

Линии напряженности:

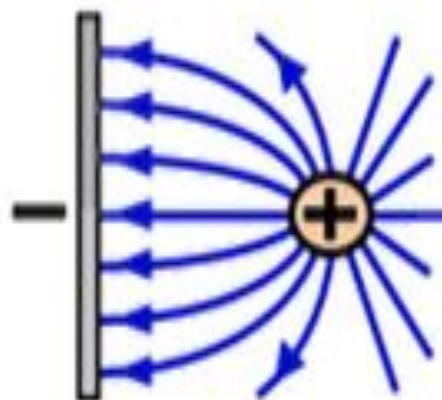
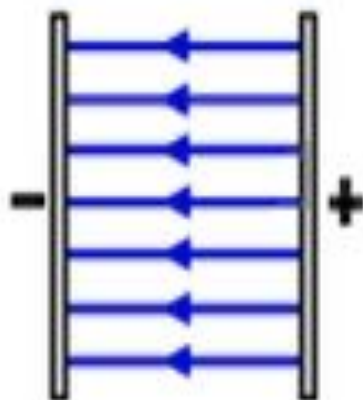
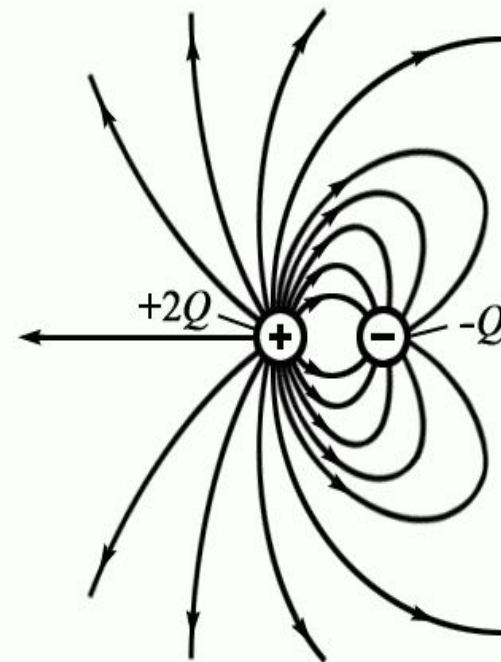
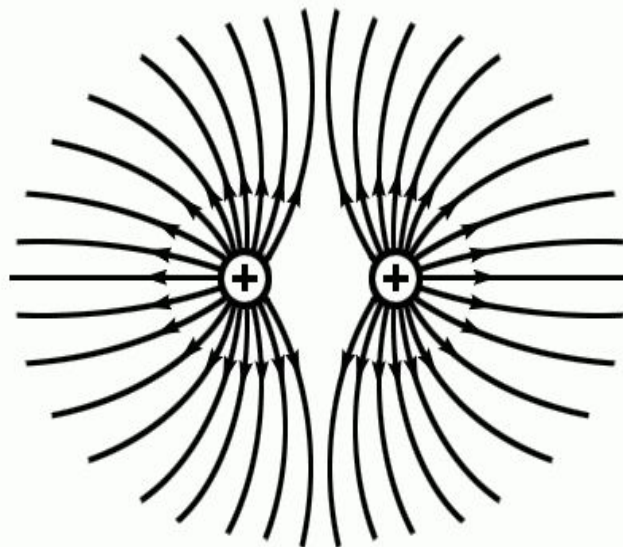
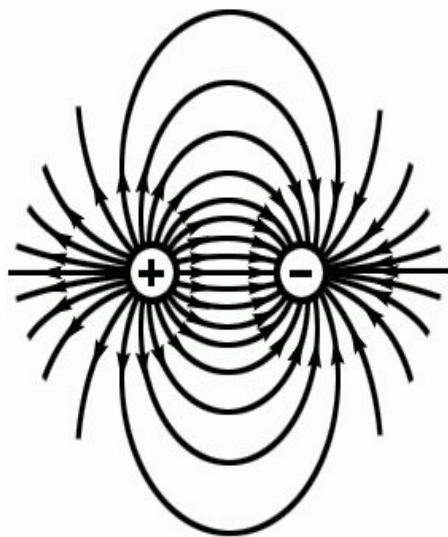


**Принцип суперпозиции:** напряженность поля нескольких зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1} \vec{E}_i . \quad (7.4)$$



## Линии напряженности электрических полей





# Закон Гаусса

Поток вектора напряженности электрического поля  $\Phi_E$  - скалярная величина, определяющая число линий напряженности электрического поля, проходящих через данную поверхность;

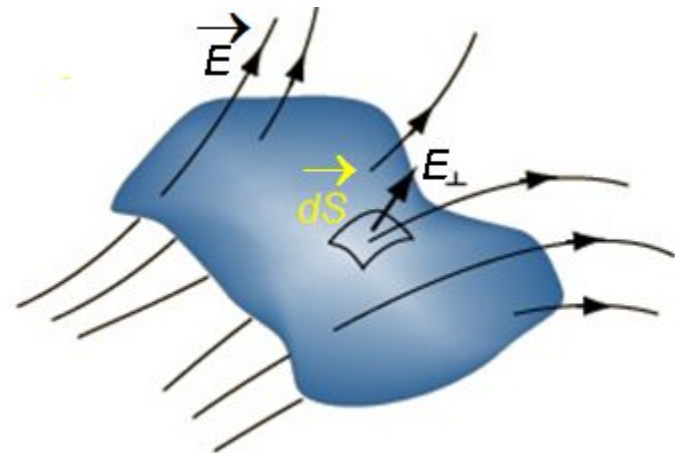
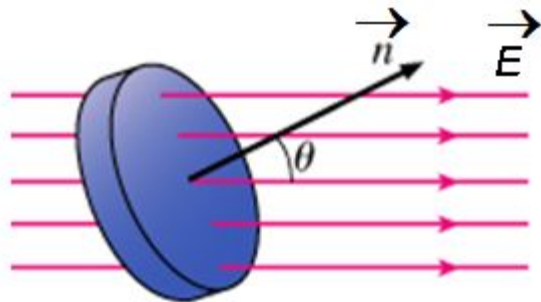
Вычисление потока вектора напряженности электрического поля

а) однородное поле, плоская поверхность:

$$\Phi_E = ES \cos \theta = \vec{E} \cdot \vec{S} \quad , \quad (7.5)$$

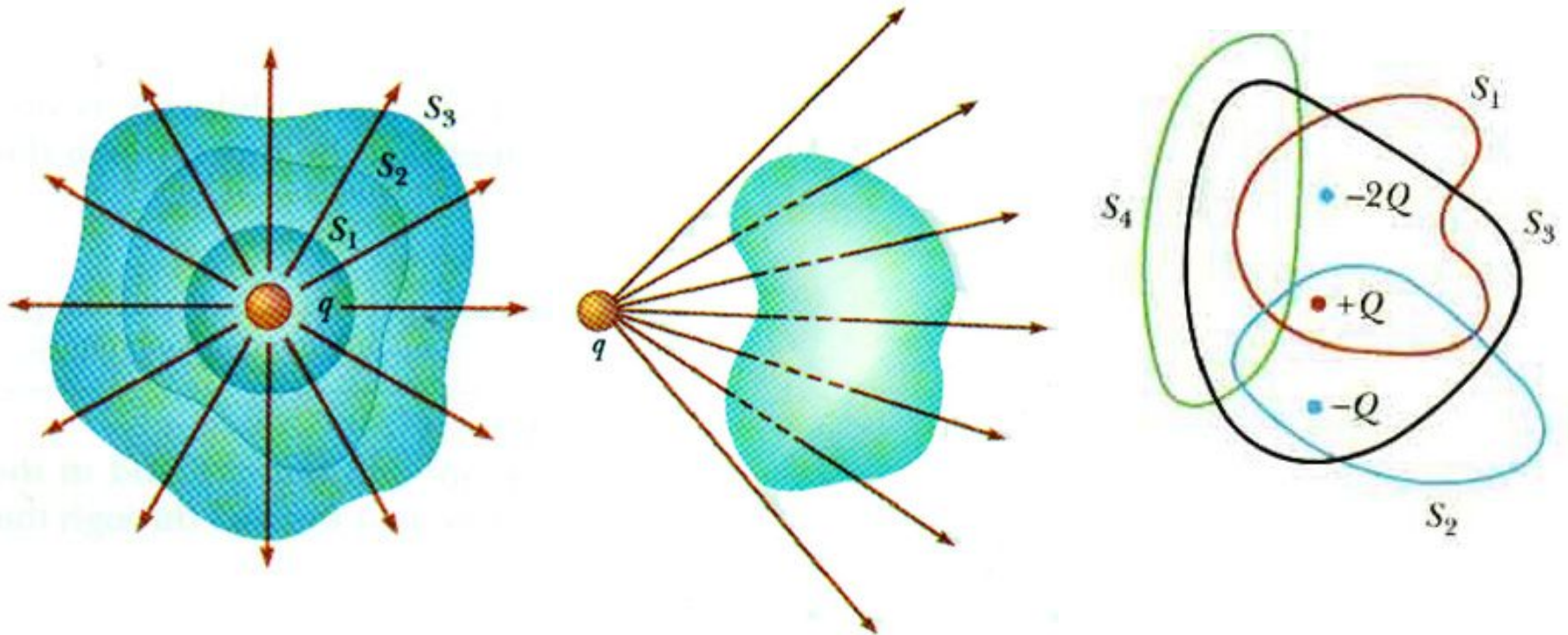
где  $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$  - вектор, численно равный площади поверхности, через которую рассчитывается поток, и направленный вдоль нормали к этой поверхности

б) общий случай:  $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad . \quad (7.6)$



**Закон Гаусса** (Иоганн Гаусс, 1839 г.): поток вектора напряженности электрического поля через любую произвольно выбранную замкнутую поверхность пропорционален алгебраической сумме электрических зарядов, охватываемых этой поверхностью:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} q_{\Sigma} \quad (7.7)$$



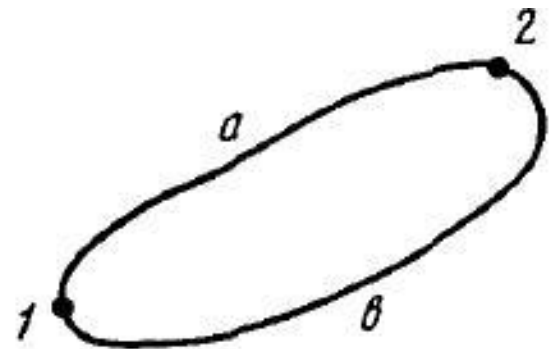
## Теорема о циркуляции вектора напряженности электростатического поля

Электростатическое поле, т.е. поле образованное неподвижными электрическими зарядами, является полем консервативных сил. Работа консервативных сил не зависит от формы траектории движения частицы, а определяется только начальным и конечным положениями частицы.

Поэтому работа консервативной силы по перемещению частицы вдоль замкнутой траектории равна нулю. Математически это свойство консервативных сил применительно к электростатическому полю записывается в виде теоремы о циркуляции вектор напряженности электростатического поля:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0 \quad . \quad (7.8)$$

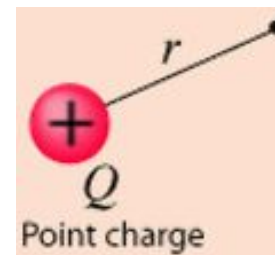
Циркуляция - линейный интеграл, вычисленный вдоль замкнутого контура.



В соответствии с уравнением (7.8) циркуляция вектора напряженности электростатического поля равна нулю.

**Электрический потенциал** – скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку электростатического поля;  $[\varphi]=\text{Дж/Кл}=\text{В}$  :

$$\varphi = \Pi/q \quad . \quad (7.9)$$



**Потенциал поля точечного заряда:**

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon r} \quad . \quad (7.10)$$

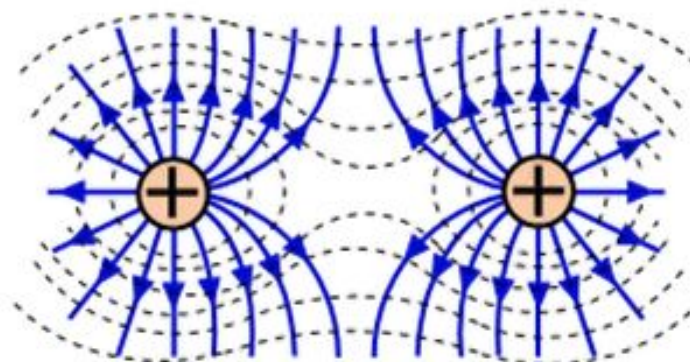
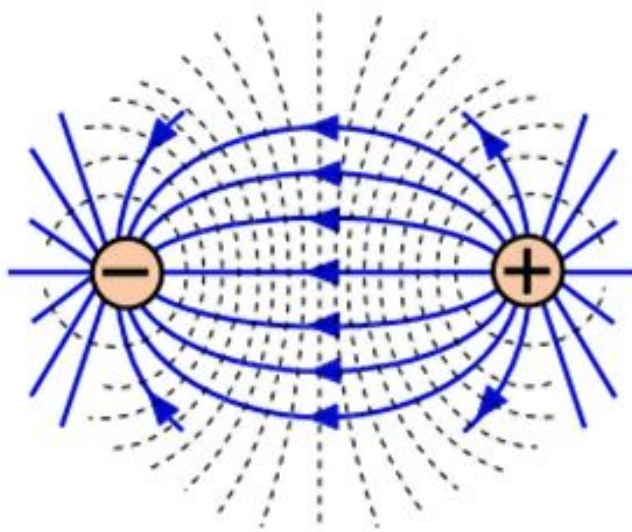
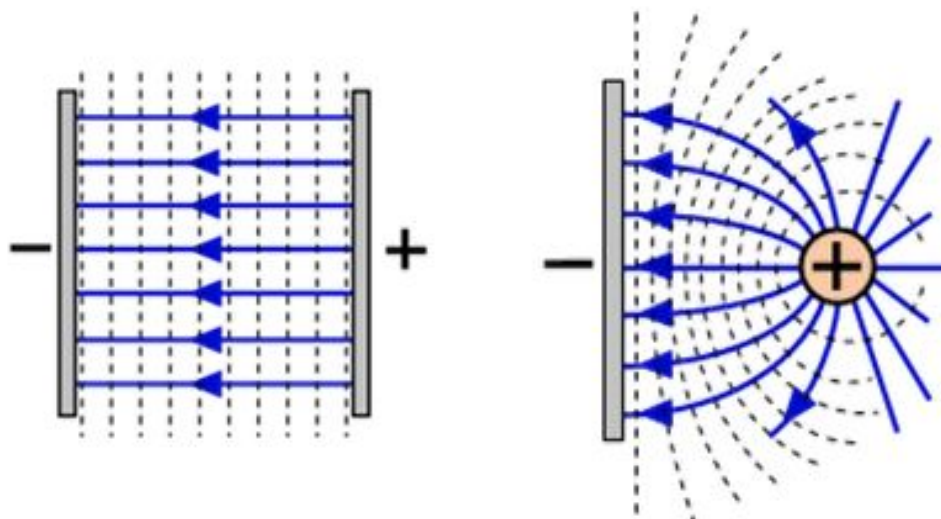
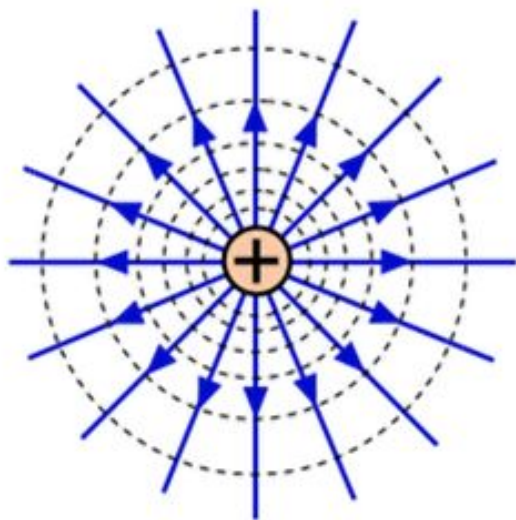
**Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении в нем электрического заряда, не зависит от длины и формы траектории и определяется выражением**

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad , \quad (7.11)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - потенциалы поля точек, определяющих соответственно начальное и конечное положение электрического заряда.

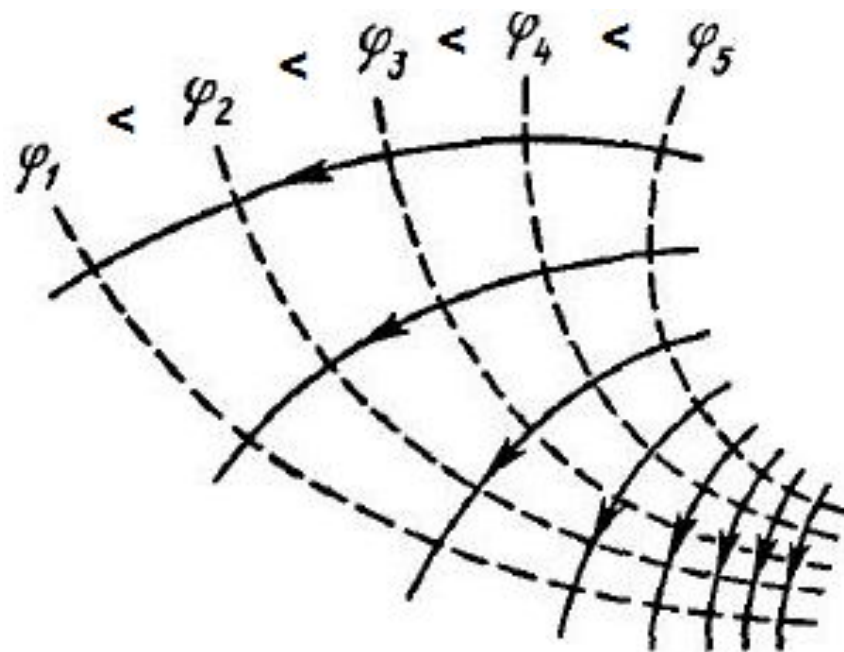
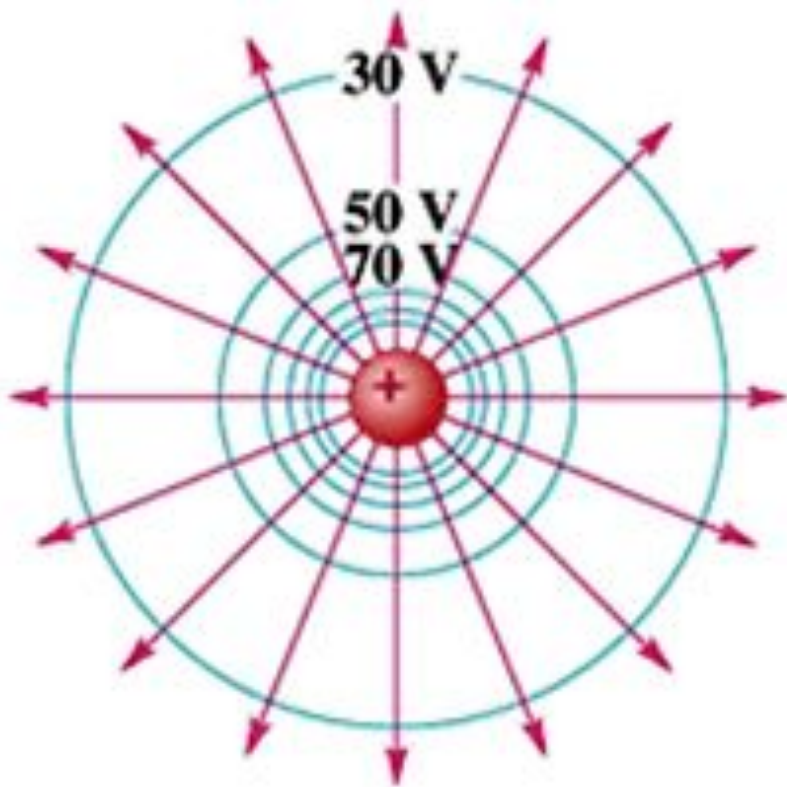
**Эквипотенциальная поверхность** – геометрическое место точек электростатического поля, в которых значения потенциала одинаковы.

# Линии напряженности и эквипотенциальные поверхности



## Связь линий напряженности и эквипотенциальных поверхностей

- 1) касательная к линии напряженности в каждой точке поля совпадает по направлению с нормалью к эквипотенциальной поверхности, проведенной через эту же точку;
- 2) линии напряженности направлены в сторону убывания потенциала.



## Связь напряженности и потенциала

Если известна напряженность  $\vec{E}(\vec{r})$ , то разность потенциалов и потенциал находят из уравнений

$$\varphi(\vec{r}_1) - \varphi(\vec{r}_2) = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}, \quad (7.12) \quad \varphi(\vec{r}) = \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_0} \vec{E} \cdot d\vec{r}, \quad (7.13)$$

где  $\vec{r}_0$  - точка, в которой потенциал принят равным нулю.

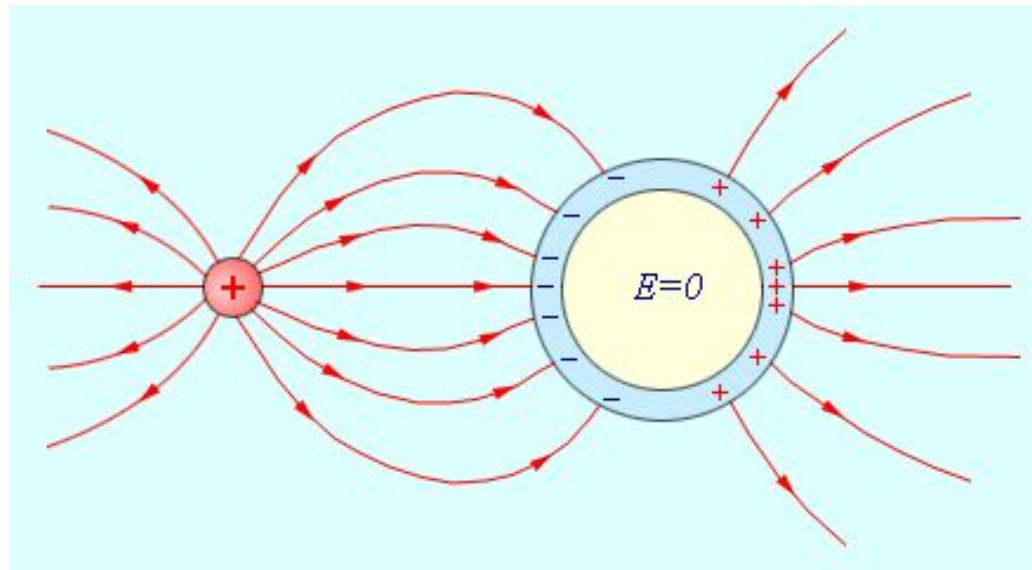
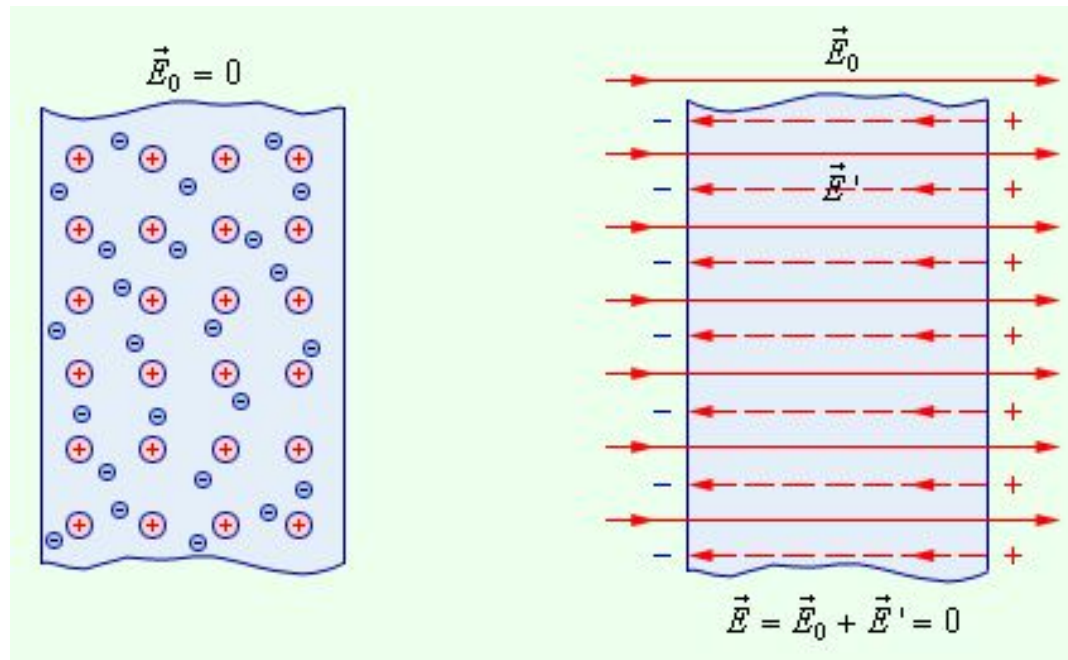
Если известен потенциал  $\varphi(\vec{r})$ , то проекцию вектора напряженности на любое направление  $l$  находят как

$$E_l = -\frac{\partial \varphi}{\partial l}, \quad (7.14)$$

а вектор напряженности – из уравнения

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla\varphi = -\left( i \frac{\partial \varphi}{\partial x} + j \frac{\partial \varphi}{\partial y} + k \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \quad (7.15)$$

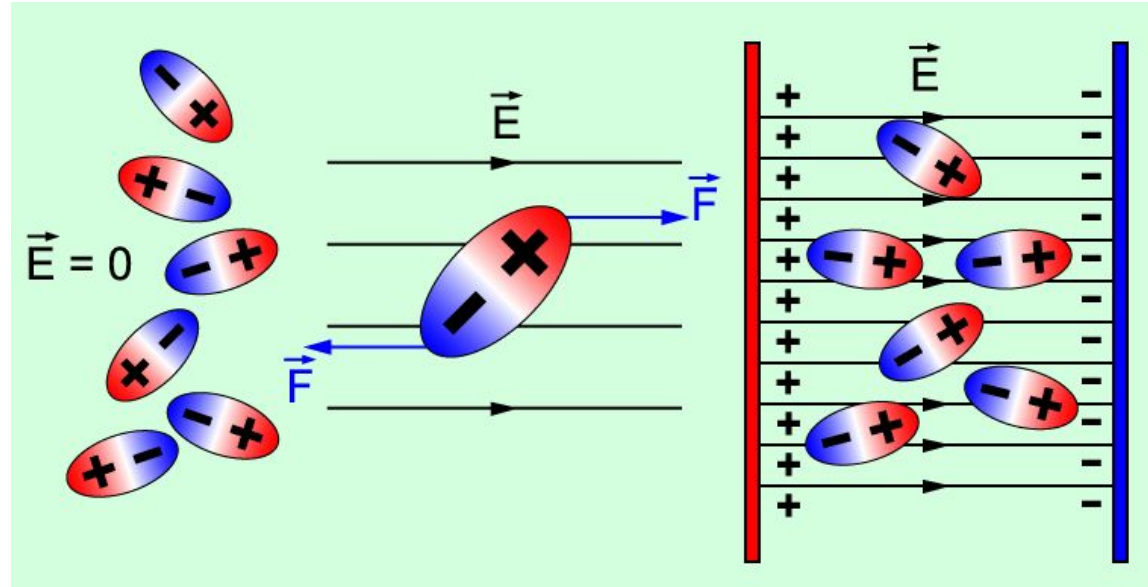
# Проводники в электрическом поле



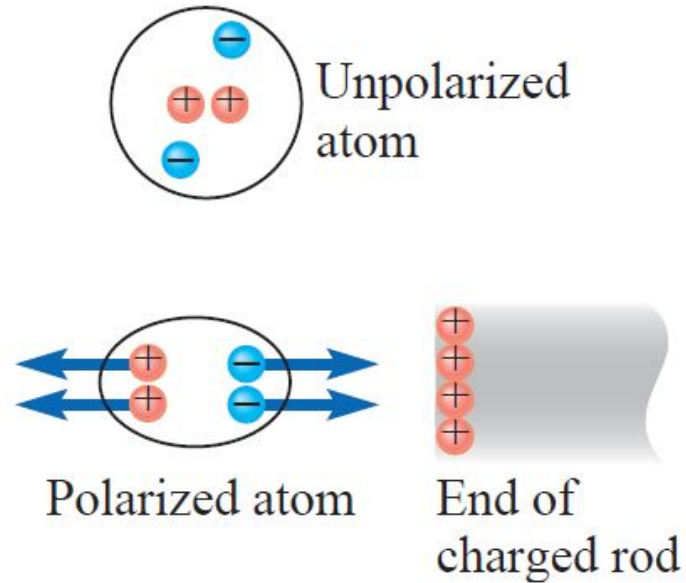


# Диэлектрики в электрическом поле

Полярные молекулы:



Неполярные атомы  
и молекулы:



## Электрическое поле в веществе

**Свободными зарядами** называются электрически заряженные микрочастицы, не связанные с конкретными атомами или молекулами вещества и способные перемещаться в нем на расстояния, многократно превышающие размеры атомов и молекул.

**Связанными** называются заряды, которые не могут перемещаться от одной части тела к другой.

Применительно к диэлектрику иногда вводят понятие **сторонних зарядов**, под которыми понимают свободные заряды, наносимые на диэлектрик извне.

В веществе различают:

**Напряженность электрического поля**,  $E$  – это характеристика электрического поля, создаваемого как свободными, так и связанными электрическими зарядами.

**Электрическое смещение**,  $D$  - это характеристика электрического поля, создаваемого только свободными зарядами.

В однородном и изотропном диэлектрике

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad . \quad (7.16)$$

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества.

# Електроємкост

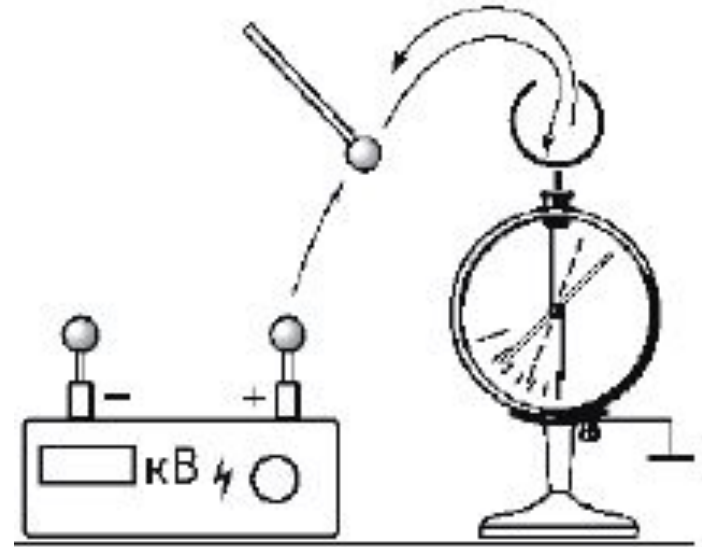
Електроємкост проводника – скалярна величина, характеризуюча здатність проводника утримувати електричний заряд і численно рівна заряду, який необхідно повідомити проводнику, щоб його потенціал став рівним 1 В;  $[C]=\text{Кл}/\text{В}=\Phi$ :

$$C = q/\varphi . \quad (7.17)$$

Електроємкост залежить від форми і розмірів проводника, а також від електричних властивостей середовища, в якому знаходиться проводник.

Електроємкост сфери радіуса  $R$  :

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R \quad (7.18)$$



**Конденсатор** – система двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика.

**Емкость конденсатора:**

$$C = q/U \quad , \quad (7.19)$$

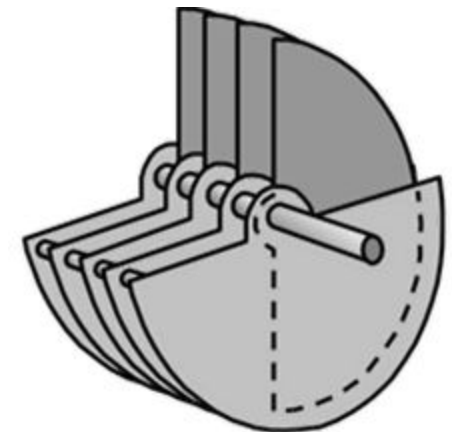
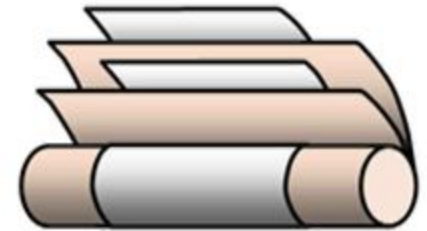
где  $q$  - модуль заряда, сообщаемого каждой из обкладок конденсатора;

$U$  - разность потенциалов (напряжение) между обкладками.

**Емкость плоского конденсатора:**

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \quad , \quad (7.20)$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами конденсатора;  $S$  - площадь одной из пластин конденсатора;  $d$  - расстояние между пластинами.



## Энергия электрического поля

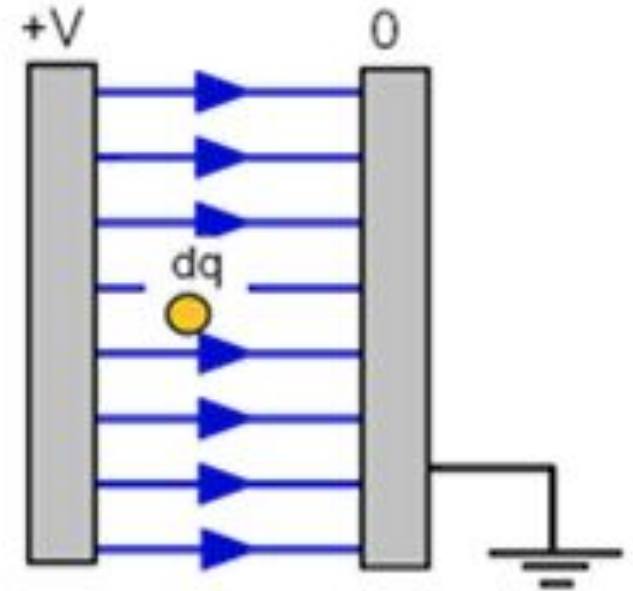
Работа по разрядке конденсатора:

$$A = \int_0^Q V dq = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C} .$$

Энергия, запасенная конденсатором	=	Работа по разрядке конденсатора
---	---	---------------------------------------

Энергия заряженного конденсатора:

$$(7.21) \quad W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2} .$$



Плотность энергии электрического поля:

$$w_e = \frac{W_e}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{8\pi} E^2 = \frac{1}{8\pi} \vec{E} \cdot \vec{D} . \quad (7.22)$$