



***Проводники в  
электростатическом  
поле. Электроемкость***

***Лекция № 5***

## *Содержание лекции:*

- *Проводники в электростатическом поле*
- *Электростатическая индукция*
- *Электрическая емкость*
- *Конденсаторы. Соединения конденсаторов*
- *Энергия электрического поля*

# **Проводники в электростатическом поле**

## **Поле в однородном проводнике**

**Проводники** - металлы, электролиты и плазма - содержат свободные заряды, способные перемещаться в пределах тела под действием сколь угодно слабого электростатического поля.

Если есть источник сторонних сил (некулоновских, неконсервативных и непотенциальных), то движение зарядов можно поддерживать непрерывно.

В условиях электростатики рассматриваем действие только кулоновские силы.

- Поле этих сил вызывает в проводнике перераспределение зарядов, приводящее к исчезновению **поля внутри проводника**  $\vec{E} = 0$

- Если  $\vec{E} = 0$ , то  $\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho dV$  т.о.  $\rho = 0$   
**-внутри проводника отсутствуют избыточные заряды.**

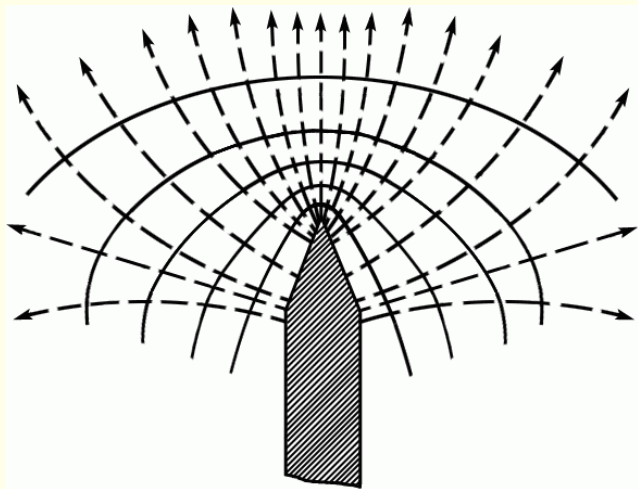
- Т.к.  $E = 0$ , тогда  $E = -\nabla \varphi = 0$ ,  $\varphi = const$

Проводник представляет собой эквипотенциальную область и его поверхность является эквипотенциальной.

- Вектор  $E$  направлен в каждой точке по нормали к поверхности проводника.  $\vec{E} = \vec{E}_n$

В силу своего взаимного отталкивания одноименные заряды, образующие заряд проводника, **стремятся расположиться на максимальном расстоянии друг от друга** — поверхностная плотность электричества будет максимальна на наиболее удаленных выступающих участках проводника с максимальной кривизной (например, на остриях).

# Поле заряженного проводника

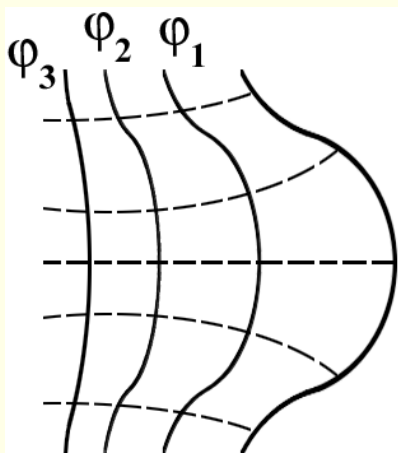


На больших расстояниях от проводника эквипотенциальные поверхности имеют сферическую форму (как у точечного заряда).

По мере приближения к проводнику они приобретают форму, подобную форме проводника.

Вблизи выступов эквипотенциальные поверхности располагаются гуще.

**Плотность зарядов** (напряженность электрического поля) определяется **кривизной поверхности** проводника:

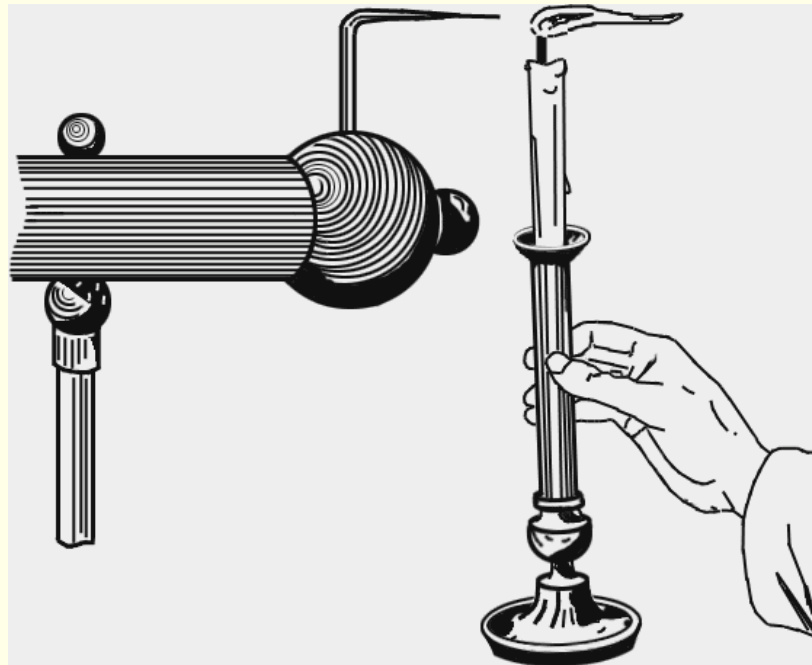


- **возрастает** при увеличении положительной кривизны (**выпуклость**)

- **убывает** при увеличении отрицательной кривизны (**вогнутость**)

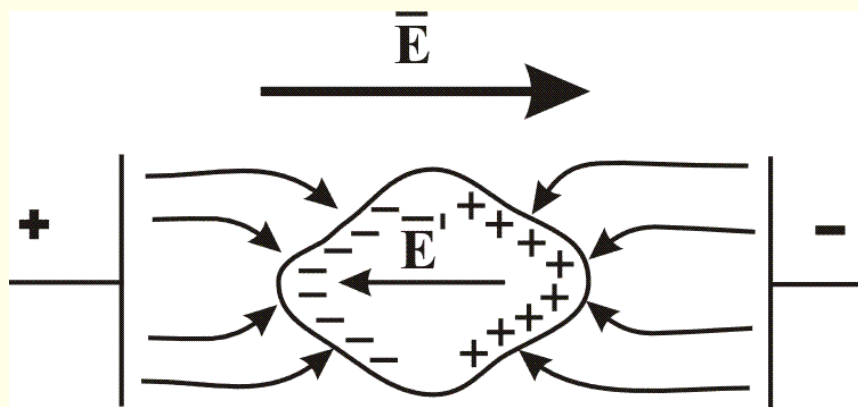
Напряженность электрического поля настолько велика на остриях, что возможна **ионизация молекул газа**, окружающего проводник:

- Ионы противоположного знака по отношению к заряду проводника движутся к проводнику, нейтрализуя его заряд
- Ионы того же знака отталкиваются от проводника, увлекая за собой нейтральные молекулы газа – возникает **электрический ветер** (заряд проводника уменьшается, «стекая» с острия).



«Электрический ветер»

# Электростатическая индукция



При внесении незаряженного проводника в электрическое поле у его концов возникают индуцированные (наведенные) заряды.

**Поле индуцированных зарядов направлено противоположно внешнему полю.**

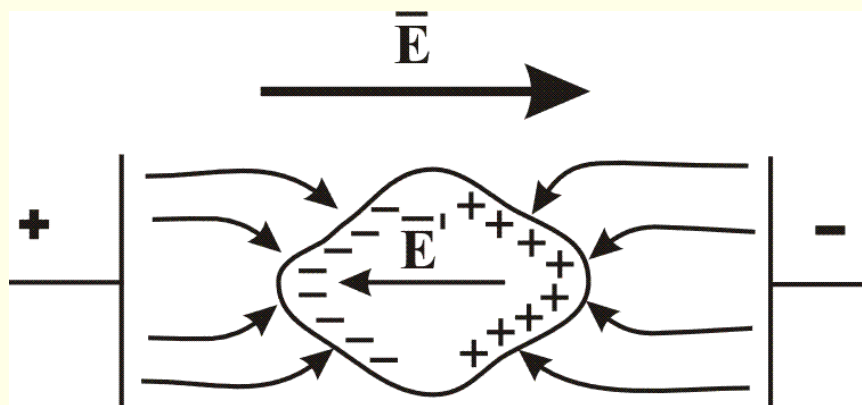
Накапливание зарядов у концов проводника ослабляет поле в нем.



Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока не будут выполняться условия:

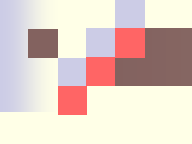
$$\begin{cases} \vec{E}_{\text{внутр}} = 0 \quad (\varphi_{\text{внутр}} = \text{const}) \\ \vec{E}_{\text{пов}} = \vec{E}_n \end{cases}$$

- при внесении нейтрального проводника во внешнее электрическое поле он **разрывает часть линий напряженности**: они заканчиваются на отрицательных, и вновь начинаются на положительных зарядах.



Явление перераспределения зарядов в проводнике во внешнем электростатическом поле называется *электростатической индукцией*.

Так как концентрация свободных электронов в проводниках (металлах) очень высока, то перераспределение зарядов происходит до тех пор, пока результирующее поле в металле не окажется равным нулю.



Так как заряды и электростатическое поле внутри полости металла, находящегося в электрическом поле, отсутствуют, то на этом и была основана электростатическая защита – экранирование тел (измерительные приборы, колебательный контур) от влияния внешних электрических полей. Если проводник с полостью заземлить, то потенциал во всех точках полости равен нулю, т. е. полость полностью изолирована от внешних электрических полей. Вместо сплошного проводника часто используют густую металлическую сетку.

# Электрическая емкость

**Электроемкость (емкость)** – характеристика проводящего тела, связанная с его способностью накапливать электрический заряд.

**Для уединенного проводника:**

В силу принципа суперпозиции потенциал тела  $\varphi$  растет пропорционально заряду проводника

$$q: \quad q = C\varphi.$$

$C$  - электрическая емкость.

*Численно емкость равна заряду, который необходимо сообщить уединенному проводнику для того, чтобы увеличить его потенциал на единицу:*

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

$$[C] = \Phi \text{ (фарад)}$$

*1 фарад – это емкость, при которой потенциал проводника изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл.*

*Емкость проводника зависит от его формы и размеров, свойств окружающей среды ( $\epsilon$ ).*

# Конденсаторы

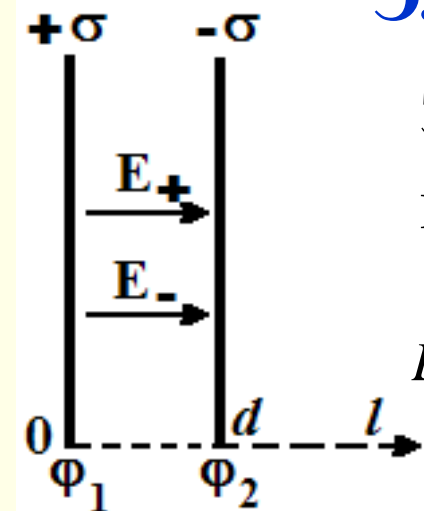
(лат. *condensator* – тот, кто уплотняет, сгущает) – устройство, которое способно при небольшом относительно других тел потенциале накапливать большой электрический заряд. **Конденсатор** – система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, продольные размеры которых много больше расстояния между ними.

**Электроемкость конденсатора:**

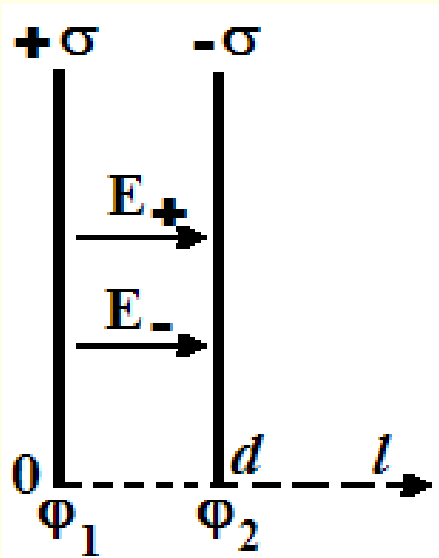
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{U}$$

Электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора:

$$E_- = E_+ = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}, \quad E = E_- + E_+ = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$$



# Емкость плоского конденсатора.



$$E = - \frac{d\varphi}{dl} \quad \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = - \int_0^d E dl$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -E \cdot d \quad \varphi_1 - \varphi_2 = E \cdot d$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U, \quad \text{где } U \text{ — разность потенциалов}$$

$$U = E \cdot d = \frac{\sigma \cdot d}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad C = \frac{q}{U} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\sigma \cdot d} = \frac{S \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d}$$

T.O.

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

Каждый конденсатор характеризуется **предельным напряжением**, при котором происходит разрушение диэлектрика между его обкладками – **пробой конденсатора**.

### Цилиндрический конденсатор:

$l$  – длина конденсатора

$R_1$  – радиус внутреннего цилиндра

$R_2$  – радиус внешнего цилиндра

$$C = \frac{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l}{\ln (R_2 / R_1)}$$

### Сферический конденсатор:

$R_1$  – радиус внутренней сферы

$R_2$  – радиус внешней сферы

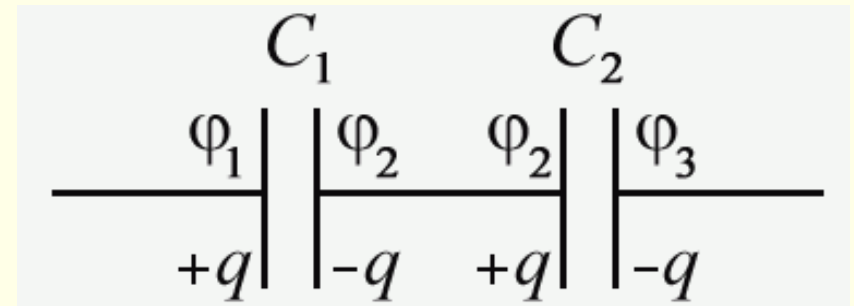
$$C = 4 \pi \epsilon \epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$



# Соединения конденсаторов

## Последовательное:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 - \varphi_3 = \\ = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3), \\ q_1 = q_2 = q \end{array} \right.$$



Тогда

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_3}{q} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{q}$$

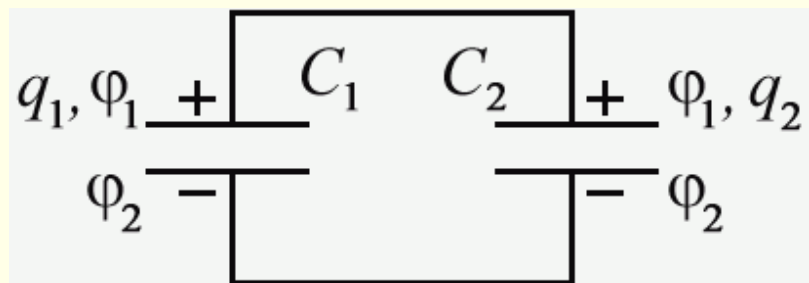
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

## Параллельное:

$$q = q_1 + q_2,$$

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \varphi_1 - \varphi_2.$$



Разделив первое равенство на второе, получим:

$$C = \frac{q_1}{\Delta\varphi} + \frac{q_2}{\Delta\varphi} = C_1 + C_2$$

Для произвольного числа конденсаторов:

$$C = \sum_i C_i$$

# Энергия электрического поля

Заряженный проводник можно рассматривать как систему точечных зарядов, энергия взаимодействия которых есть

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i \quad (\text{рассматривается попарное взаимодействие})$$

$\varphi_i$  – потенциал, создаваемый всеми зарядами, кроме  $q_i$ , в месте нахождения  $q_i$ .

**Поверхность проводника - эквипотенциальна:**

$$W_{\text{пров}} = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi = \frac{1}{2} \varphi \sum q_i = \frac{q \varphi}{2}$$

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

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

## Энергия заряженного конденсатора

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

## Объемная плотность энергии:

в случае однородного поля (плоский конденсатор):

$$\omega_E = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{2Sd}$$