

# **ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

- 1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике.**
- 2. Определение напряженности электростатического поля вблизи проводника.**
- 3. Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике.**
- 4. Конденсаторы.**
  - 4.1. Электрическая емкость. Конденсаторы.**
  - 4.2. Соединение конденсаторов.**
  - 4.3. Расчет емкостей различных конденсаторов.**
  - 4.4. Энергия заряженного конденсатора.**
- 5. Энергия электростатического поля.**

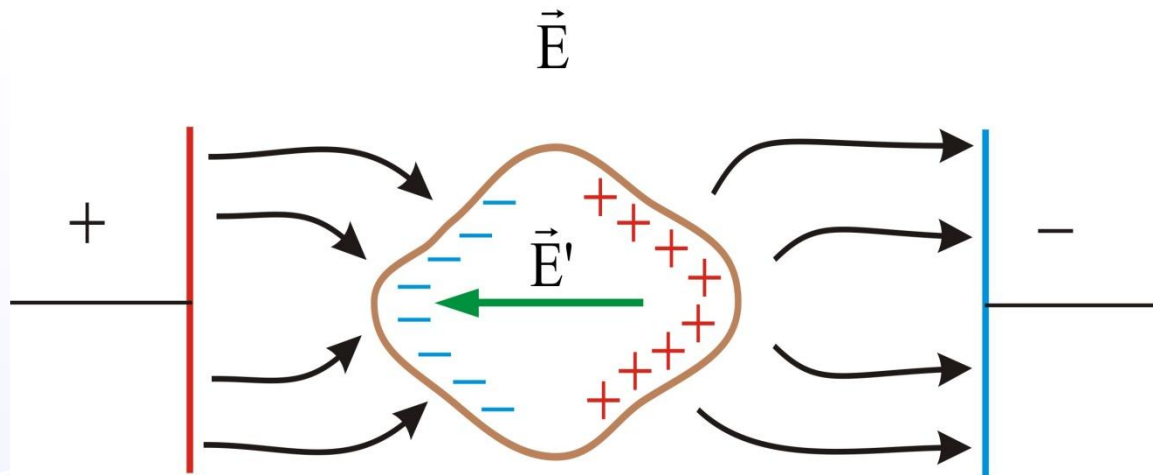
# 1. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – носители заряда (электроны в металлах, ионы в электролитах) способные перемещаться по всему объему проводника под действием внешнего электростатического поля.

**Носителями заряда в металлах являются электроны проводимости.**

**При отсутствии электрического поля металлический проводник является электрически нейтральным – электростатическое поле создаваемое положительными и отрицательными зарядами внутри него компенсируется.**

- ▶ При внесении металлического проводника во внешнее электростатическое поле, **электроны проводимости перемещаются (перераспределяются)** до тех пор, пока всюду внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не скомпенсирует внешнее поле.
- ▶ **В любой точке внутри проводника, находящимся в электростатическом поле  $E = 0$ ;  $d\phi = 0$ ; т. е.  $\phi = \text{const}$ .**
- ▶ **Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{ме}} \rightarrow \infty$ .**
- ▶ **На поверхности проводника напряженность  $\vec{E}$  направлена по нормали к этой поверхности**, иначе, под действием составляющей  $E_{\tau}$ , касательной к поверхности, заряды перемещались бы по проводнику, а это противоречило бы их статическому распределению.
- ▶ Вне заряженного проводника – поле есть, следовательно, должен быть вектор  $\vec{E}$ , и направлен он перпендикулярно поверхности!

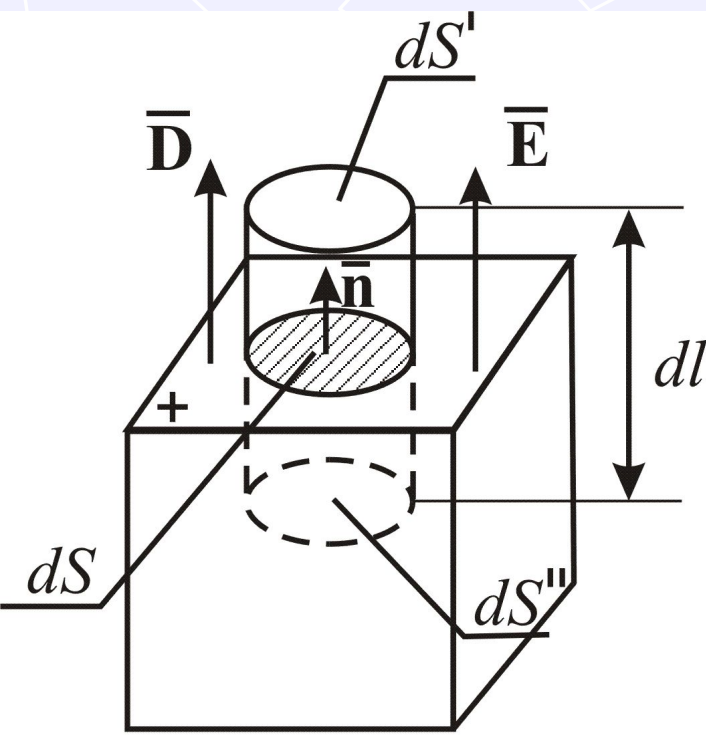


**Электростатическая индукция**- появление у заряженной поверхности на металле заряда противоположного знака. ( $t \sim 10^{-8}$  с).

- **Электростатическое экранирование** – внутри проводника поле не проникает.
- Во всех точках внутри проводника  $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ , а во всех точках на поверхности  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_n$  ( $\mathbf{E}_\tau = \mathbf{0}$ );
- Весь объем проводника, находящегося в электростатическом поле **эквипотенциален**.

## 2. Определение напряженности электростатического поля вблизи проводника

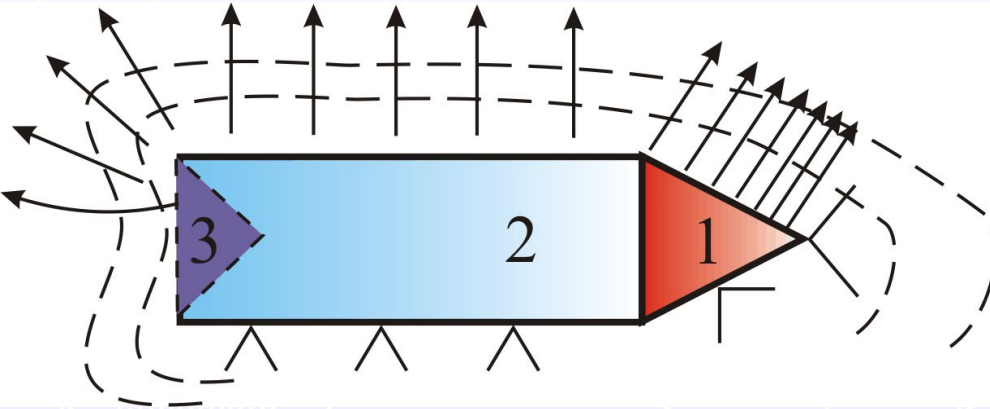
Напряженность поля вблизи поверхности заряженного проводника прямопропорциональна поверхностной плотности зарядов.



$$E_n = \frac{D_n}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

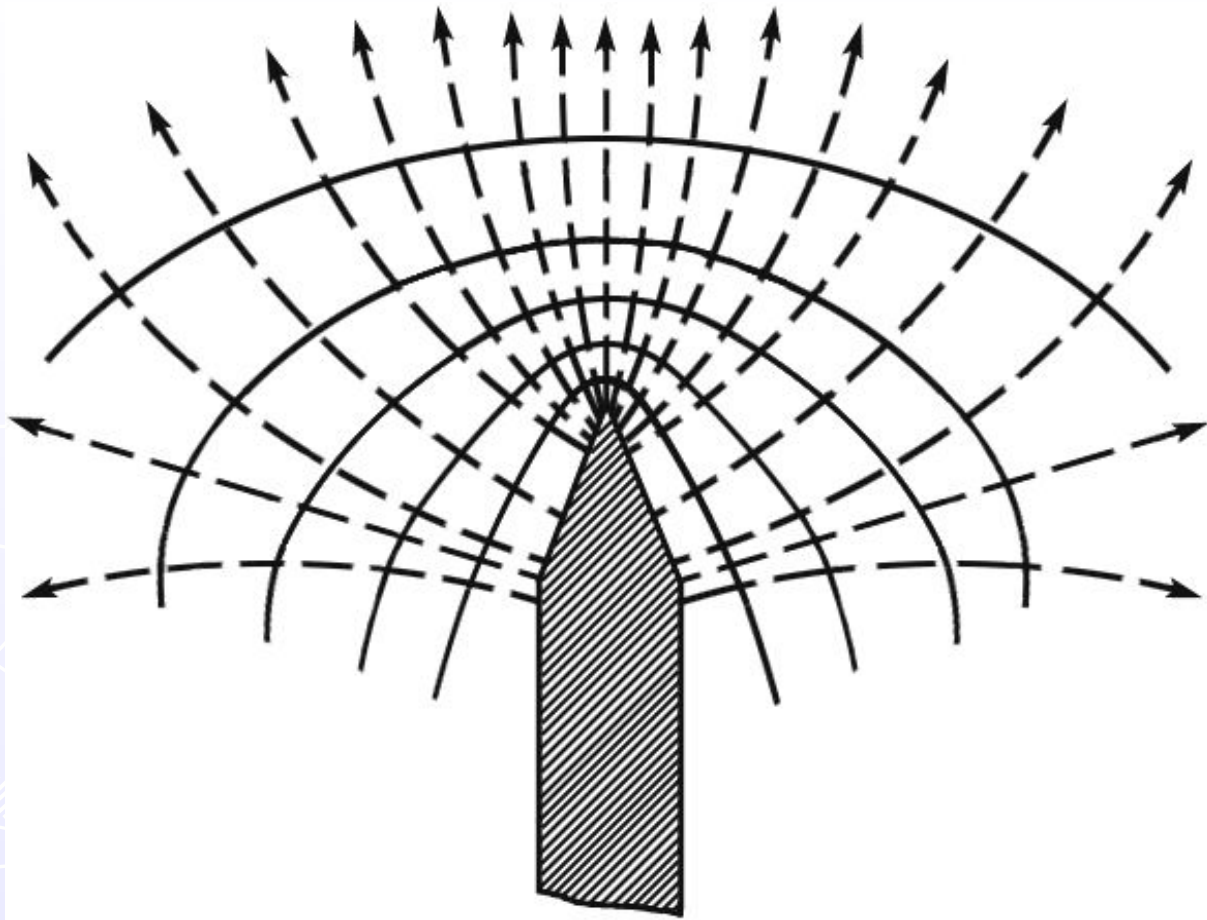
### 3. Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике

#### 1. Заряженный кондуктор.



В местах разной напряженности электростатического поля лепестки бумажки расходятся по-разному:

на поверхности 1 – максимальное расхождение,  
на поверхности 2 заряд распределен равномерно  
 $q = const$  и имеем одинаковое расхождение лепестков.

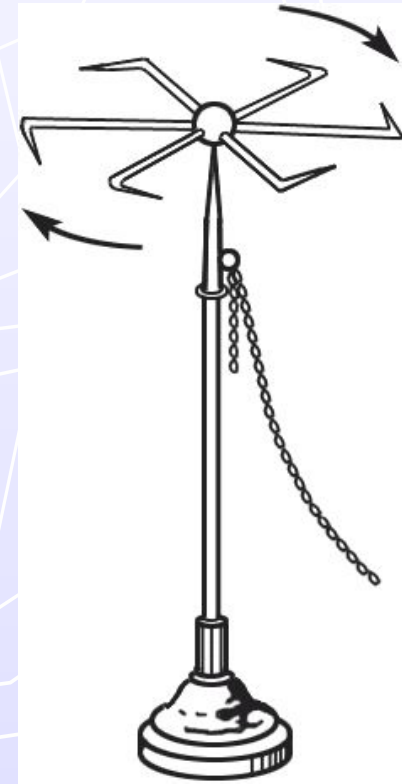
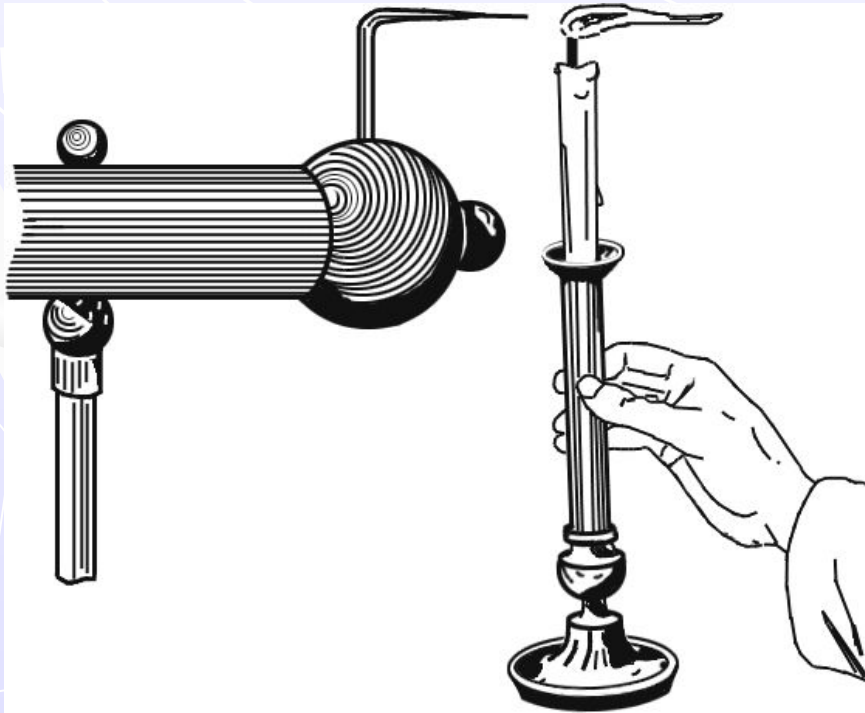


Напряженность электростатического поля  
максимальна на острие заряженного проводника.

## 2. Стеkanie электростатических зарядов с острия.

Большая напряженность поля  $E$  на остриях приводит к утечке зарядов и ионизации воздуха.

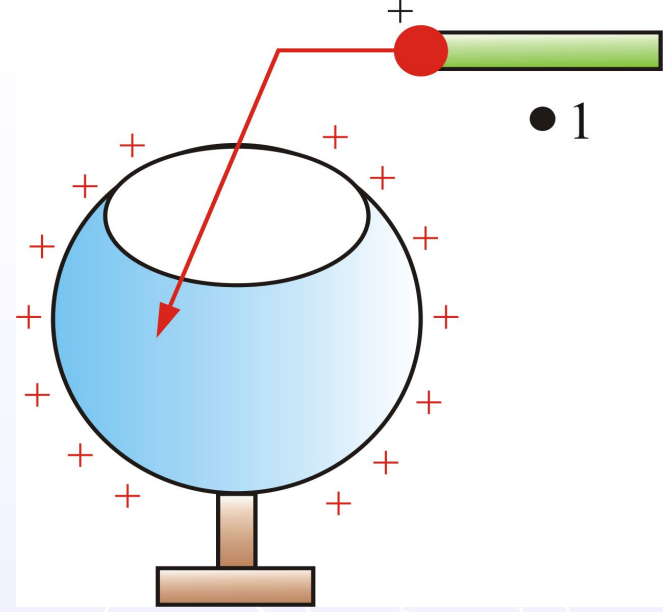
Ионы уносят электрический заряд, образуется как бы «электрический ветер»





### 3. Электростатический генератор (ЭСГ).

Если заряженный металлический шарик привести в соприкосновение с поверхностью, какого либо, проводника, то заряд шарика частично передается проводнику: шарик будет разряжаться до тех пор, пока их потенциалы не выровняются. Иначе обстоит дело, если шарик привести в соприкосновение с внутренней поверхностью полого проводника. При этом весь заряд с шарика стечет на проводник и распределится на внешней поверхности проводника.



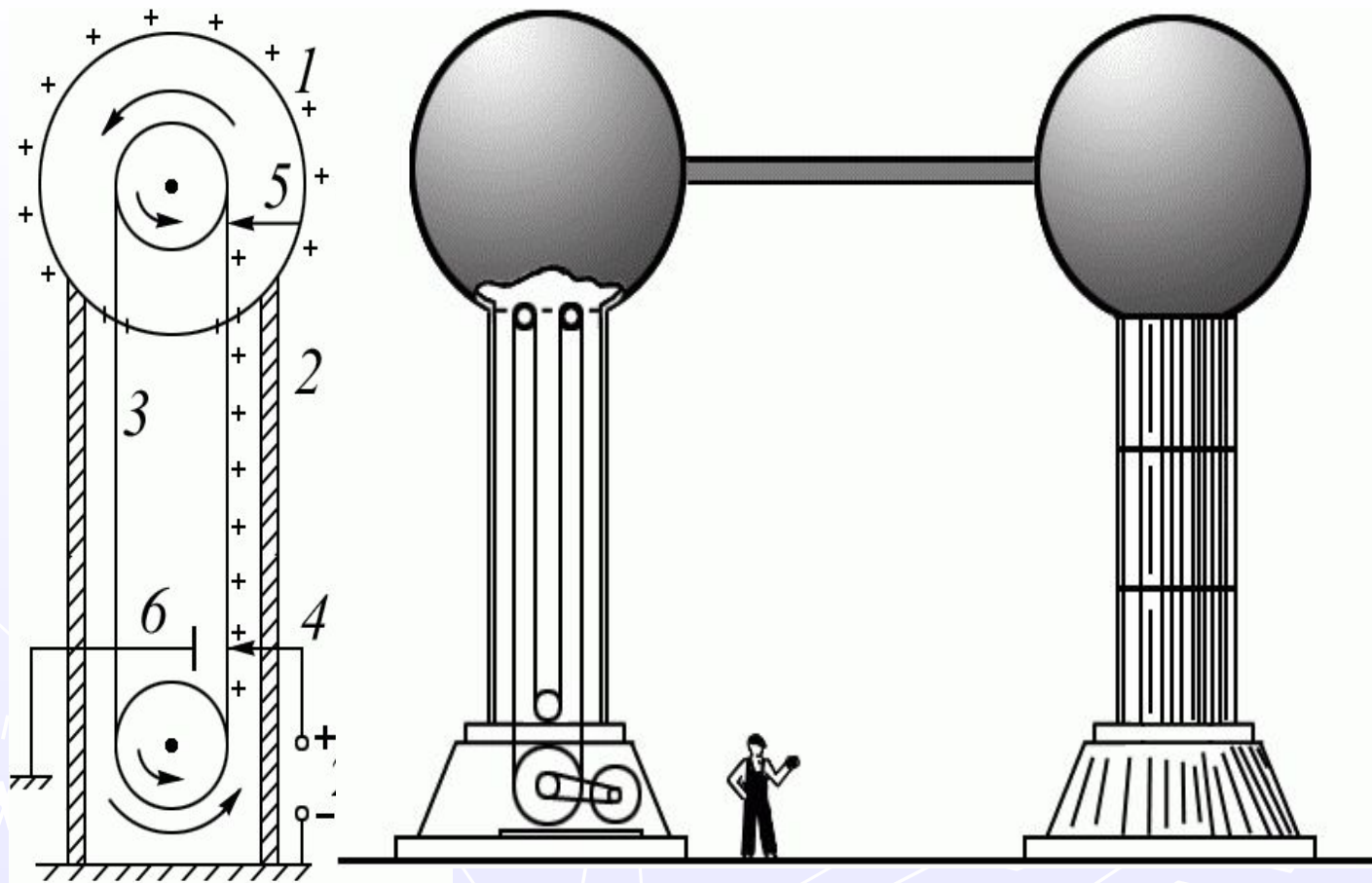


***ВАН ДЕ ГРААФ Роберт*** (1901 – 1967) -  
американский физик.

*Окончил университет штата Алабама (1922).  
Совершенствовал знания в Сорбонне и Оксфорде.  
В 1929-31 работал в Принстонском университете,  
в 1931 –60 –*

*в Масачусетском технологическом институте.*

- Научные исследования в области ядерной физики и ускорительной техники.*
- Выдвинул идею тандемного ускорителя и к 1958 построил первый тандемный ускоритель отрицательных ионов.*
- Изобрел в 1931 году высоковольтный электростатический ускоритель (генератор Ван де Граафа), спроектировал и построил генератор с диаметром сфер по 4,5 м.*
- В 1936 построил самый большой из традиционных генераторов постоянного напряжения.*



Зарядное устройство заряжает ленту транспортера положительными зарядами. Лента переносит их вовнутрь сферы и там происходит съем положительных зарядов. Далее они стекают на внешнюю поверхность. Так можно получить потенциал относительно земли в несколько миллионов вольт – ограничение – ток утечки.

## 4. Конденсаторы

### 4.1. Электрическая емкость.

При сообщении проводнику заряда, на его поверхности появляется потенциал  $\varphi$ , который пропорционален заряду  $q$ .

$$q = C\varphi$$

**Электроемкость** – физическая величина, численно равна заряду, который необходимо сообщить проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу.

- ▶ Единица измерения емкости в СИ – фарада
- ▶  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$ .

Потенциал поверхности шара  $\phi_{\text{поверхн.}} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$

$$C_{\text{шар.}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

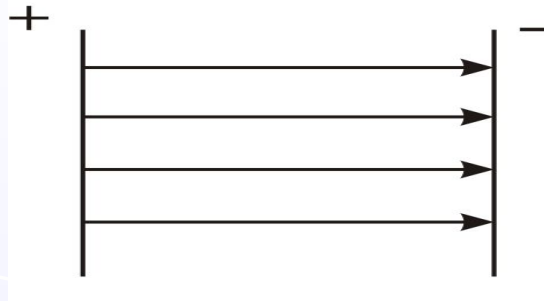
Если  $\epsilon = 1$  (воздух, вакуум) и  $R = R_{\text{земли}}$ , то  $C_3 = 7 \cdot 10^{-4}$  Ф или 700 мкФ.

Чаще на практике используют и более мелкие единицы: 1 нФ (нанофарада) =  $10^{-9}$  Ф и 1 пкФ (пикофарада) =  $10^{-12}$  Ф.

**Конденсатор** – два проводника называемые обкладками расположенные близко друг к другу.

Модель

- ▶ Электростатическое поле сосредоточено внутри конденсатора между обкладками.



- ▶ Конденсаторы бывают **плоские, цилиндрические и сферические**.

- ▶ Линии электрического смещения начинаются на положительной обкладке и заканчиваются на отрицательной – и нигде не исчезают.

Следовательно, заряды на обкладках **противоположны по знаку, но одинаковы по величине**.

- ▶ § Емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U}$$

## ▶ Емкость плоского конденсатора.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \quad U = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S},$$

где:  $S$  – площадь пластин (обкладок);  $q$  – заряд конденсатора

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

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками.

▶ Единица измерения  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon_0 = \frac{Cd}{\varepsilon S}$$

$$[\varepsilon_0] = \frac{[C] \cdot [d]}{[S]} = \frac{\Phi \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\Phi}{\text{м}}$$

▶ **Емкостные батареи** – комбинации параллельных и последовательных соединений конденсаторов.



## 4.2. Соединение конденсаторов

1) Параллельное соединение:

Общим является напряжение  $U = \text{const}$

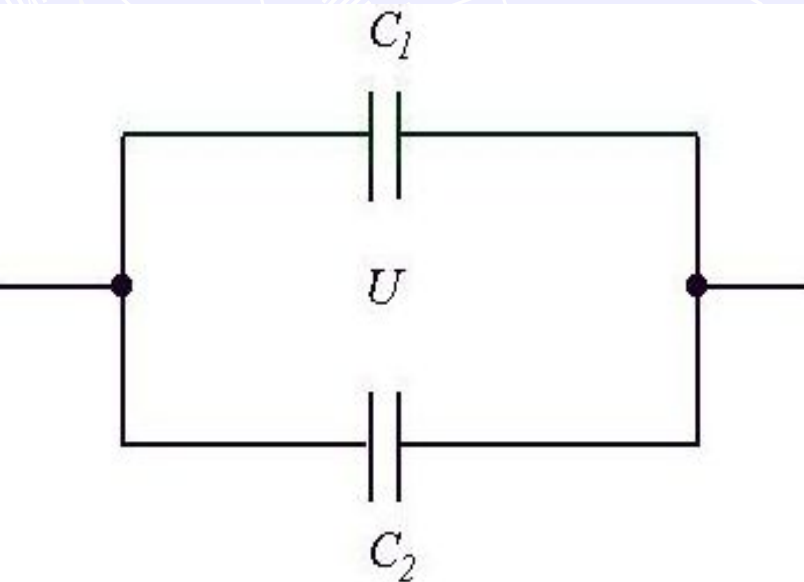
$$q_1 = C_1 U;$$

$$q_2 = C_2 U;$$

Суммарный заряд:  $q = q_1 + q_2 = U(C_1 + C_2)$ .

Результирующая емкость:

$$C = \frac{q}{U} = C_1 + C_2$$



2) Последовательное соединение :

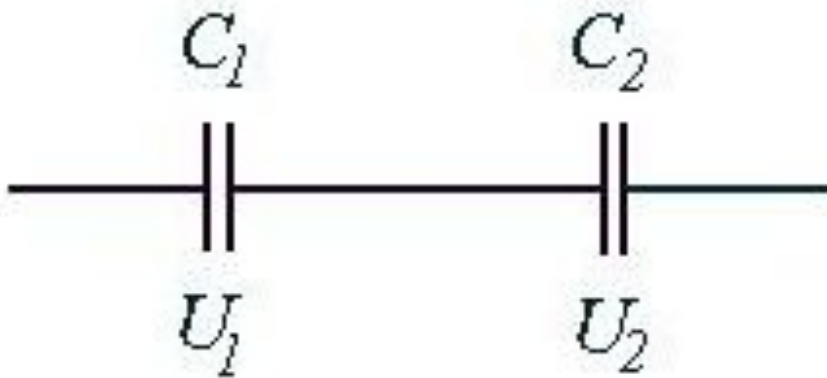
Общим является заряд  $q = \text{const}$

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2};$$

$$U = \sum U_i = q \sum \frac{1}{C_i}$$

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

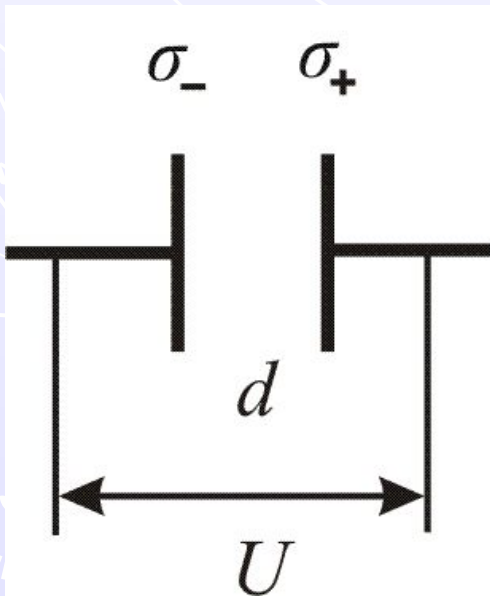
$$\frac{1}{C} = \sum \frac{1}{C_i}$$



## 4.3. Расчет емкостей различных конденсаторов

### 1. Емкость плоского конденсатора.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}; \quad \phi_1 - \phi_2 = \int_{x_2}^{x_1} E dx = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} d$$



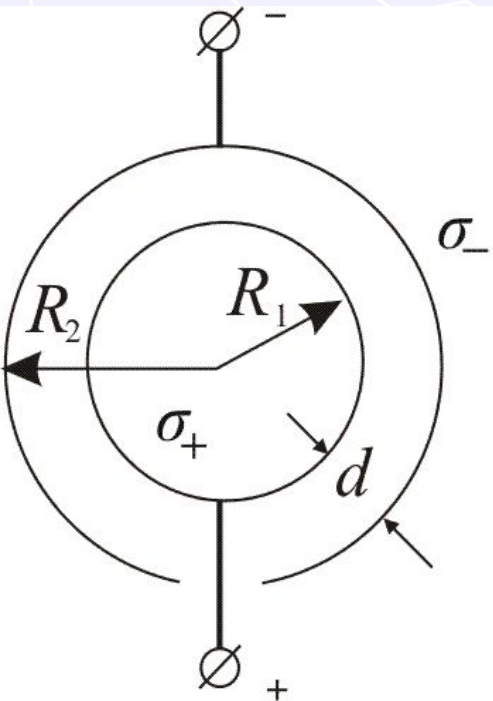
где  $d = x_2 - x_1$  – расст. м/у пластинами.  
Так как заряд  $q = \sigma S$ , то

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$$

## 2. Ёмкость шарового конденсатора.

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \Delta\phi = \frac{q}{C},$$

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



## 4.4. Энергия заряженного конденсатора

Конденсатор запасает энергию.

Конденсатор разряжается.

$U'$  – мгновенное значение напряжения на обкладках.

$dq$  – элементарный заряд при этом значении напряжения

$$dA = U'dq. \quad dA = - dWc.$$

Так как  $q = CU$ , то  $dA = CU'dU'$ , а полная работа

$$A = \int dA.$$

$$A = -W_c = C \int_U^0 U' dU' = -\frac{1}{2} CU^2$$

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

$$W_c = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} qU$$



Модель

## 5. Энергия электростатического поля

Носителем энергии в конденсаторе,  $W_c$  является электростатическое поле.

$$W_c = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} \frac{d}{d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2} \left( \frac{U}{d} \right)^2 Sd$$

$$\frac{U}{d} = E; \quad V = S * d$$

$$W_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V$$

Если поле **однородно**, заключенная в нем энергия распределяется в пространстве с постоянной плотностью.

Удельная энергия  $\omega_{уд}$ :  $\omega_{уд} = \frac{W}{V}$ ;

$$\omega_{уд} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$$

Так как  $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$ , то

$$\omega_{уд} = \frac{ED}{2}$$

Эти формулы справедливы для однородного поля.



# Энергия системы зарядов

Если поле создано двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , то

$$W_1 = q_1 \phi_{12} \quad W_2 = q_2 \phi_{21}$$

$\phi_{12}$  – потенциал поля, создаваемого зарядом  $q_2$  в точке, где расположен заряд  $q_1$ ,

$\phi_{21}$  – потенциал поля от заряда  $q_1$  в точке с зарядом  $q_2$ .



Для вакуума

$$\phi_{12} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\phi_{21} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$r$  – расстояние между зарядами.

$$W_1 = W_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} = W$$

$$W = \frac{1}{2} W_1 + \frac{1}{2} W_2 = \frac{1}{2} (q_1 \phi_{12} + q_2 \phi_{21}).$$

Энергия системы из  $N$  зарядов, :

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \phi_i$$