

Концепции и модели физики

Кузьмичев Сергей Дмитриевич



Содержание лекции №8

1. Поляризация диэлектриков.
2. Вектор поляризации.
3. Теорема Гаусса при наличии диэлектриков.
4. Вектор электрической индукции.
5. Поляризуемость и диэлектрическая проницаемость.
6. Граничные условия на границе двух диэлектриков.
7. Электрическая ёмкость.
8. Конденсаторы. Ёмкость плоского, сферического и плоского конденсаторов.

Поляризация диэлектриков

Свободные заряды могут оказаться в любой точке вещества.

Связанные заряды могут смещаться на небольшие расстояния относительно равновесного положения.

Диэлектрики – вещества с малым количеством свободных зарядов (плохо проводят электрический ток).

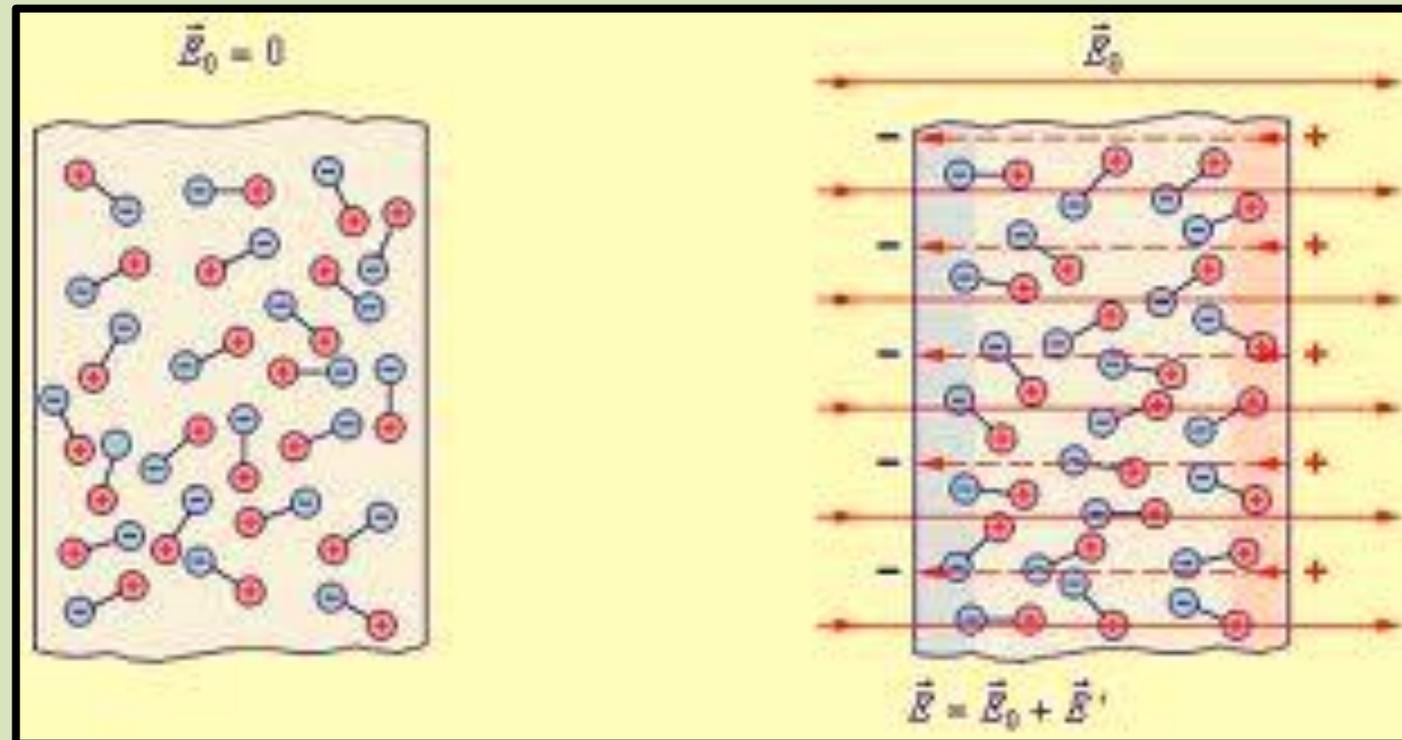
Поляризация – пространственное перераспределение связанных зарядов в веществе, приводящее к появлению объёмного дипольного момента.

Причины поляризации – электрическое поле, механическое воздействие (пьезоэлектрики), изменение температуры (пироэлектрики, сегнетоэлектрики).

Механизмы поляризации диэлектриков

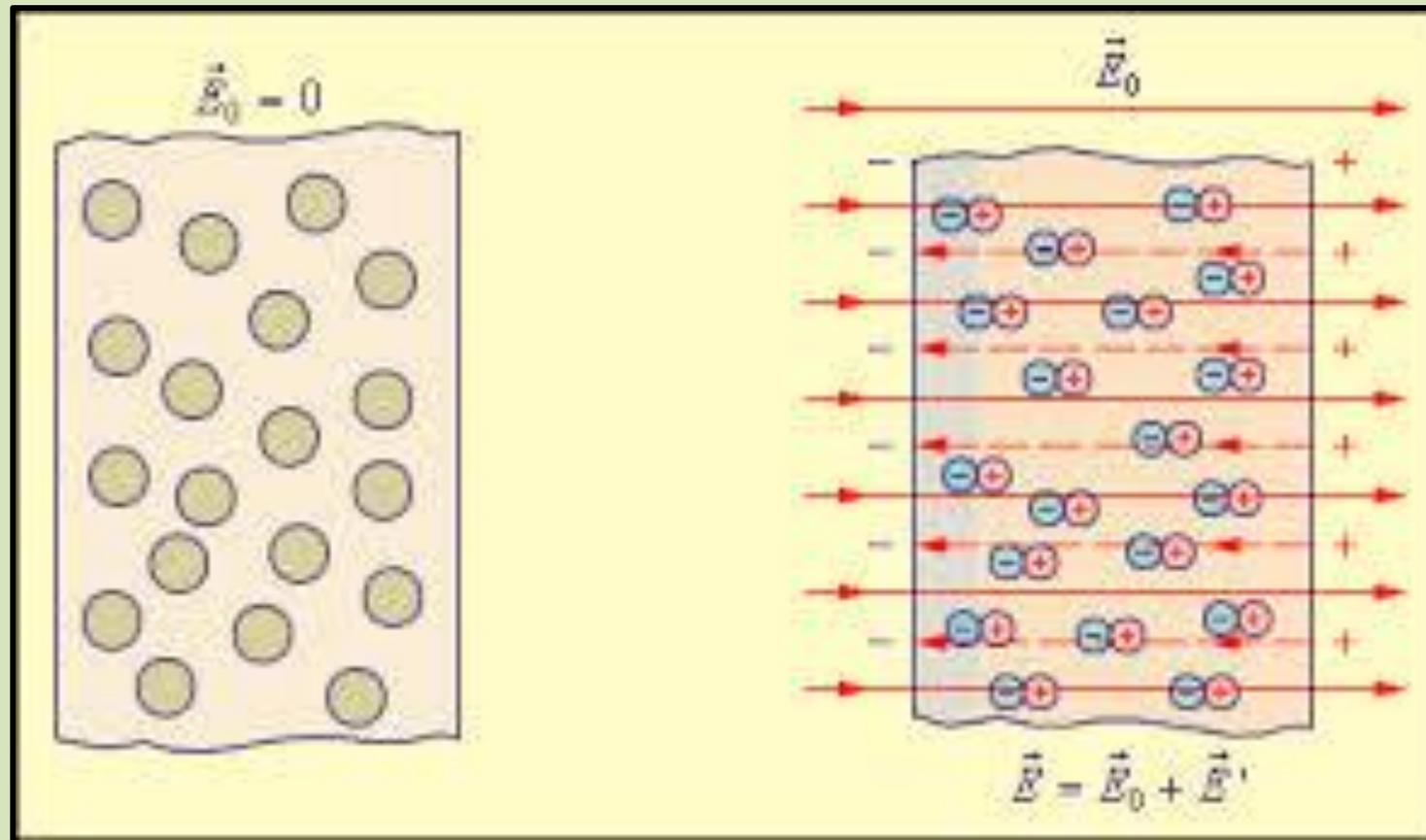
В диэлектрике с **жёсткими диполями** под действием внешнего электрического поля происходит ориентация (разворот) диполей по направлению поля. Тепловое движение стремится разориентировать диполи.

Примеры веществ: H_2O , HCl , HBr , NH_3 , HCl .

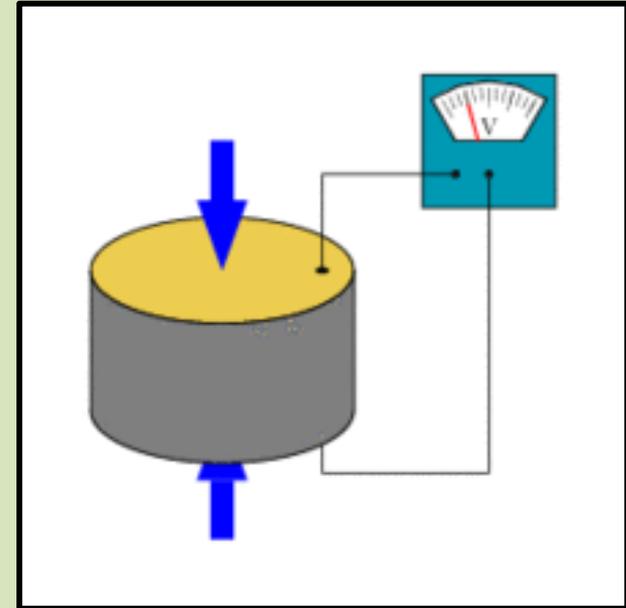
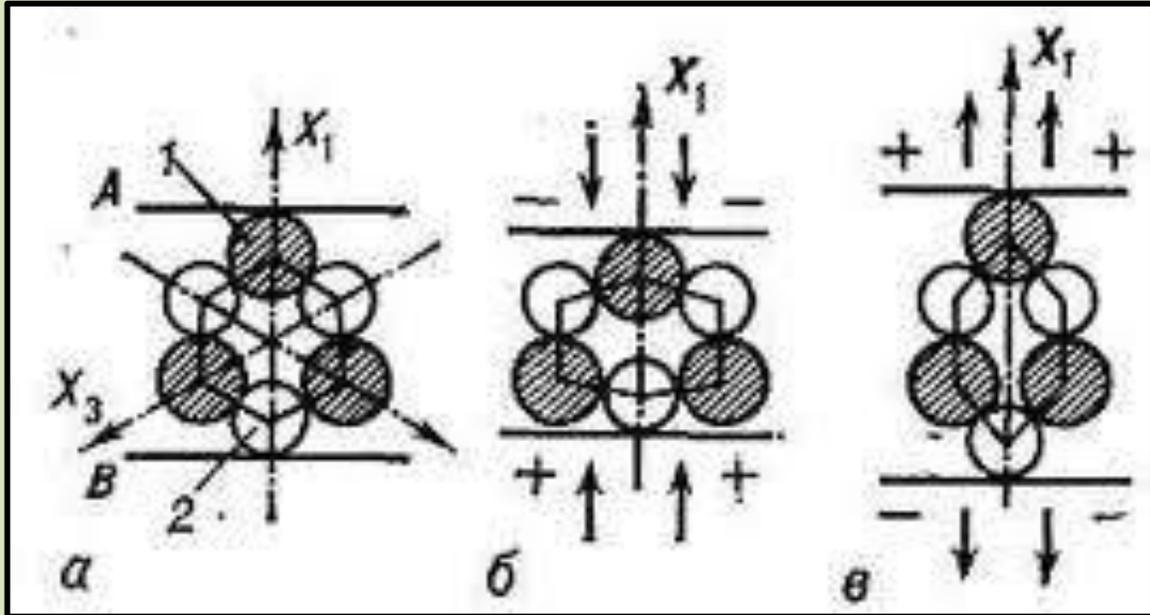


В диэлектрике с **упругими диполями** под действием внешнего электрического поля происходит смещение зарядов внутри молекулы, приводящее к появлению дипольного момента.

Примеры веществ: $H_2, N_2, CO_2, NaCl$.



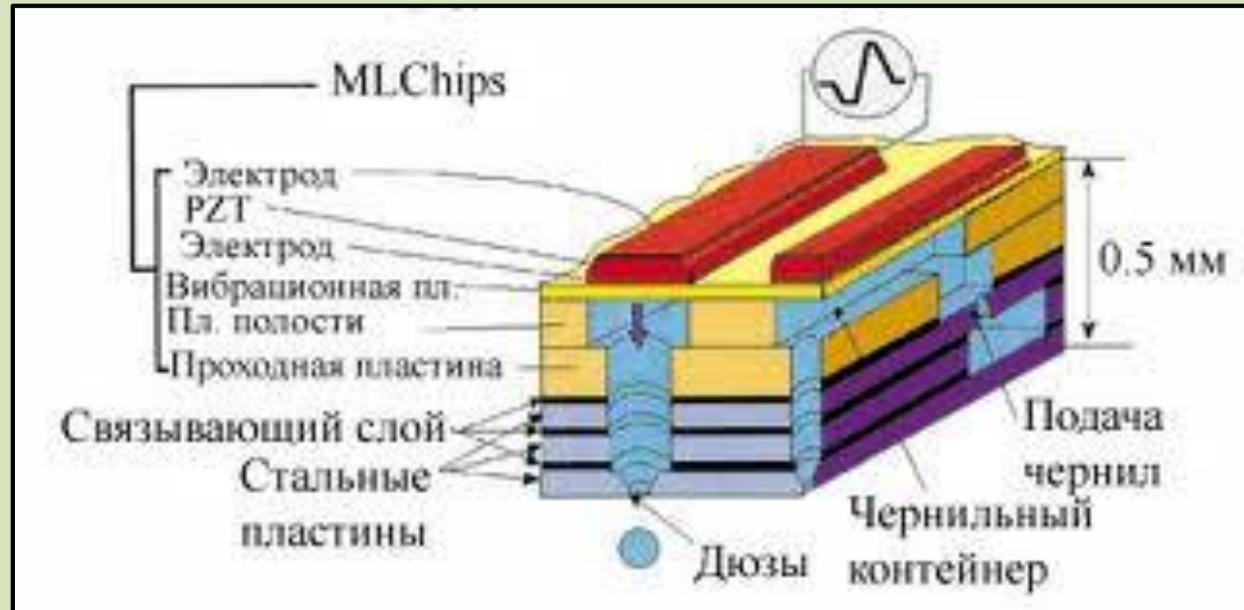
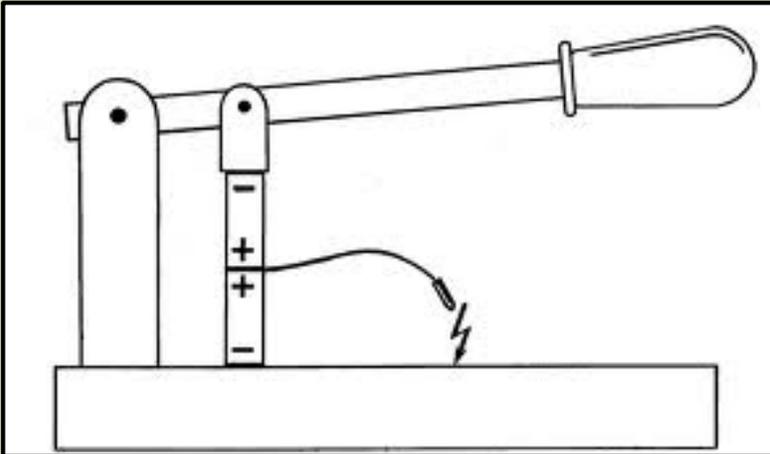
В пьезоэлектриках поляризация возникает при механическом воздействии. Примеры веществ: кварц (SiO_2).



$$P = 10^5 \text{ Па}, \quad \sigma = 2,33 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} / \text{м}^2, \quad E \approx 240 \text{ В} / \text{см},$$

$$h = 0,5 \text{ см}, \quad \Delta\varphi = 120 \text{ В}.$$

Применение пьезоэлектриков: датчики давления, детонаторы, кварцевые резонаторы для высокостабильных генераторов частоты, пьезозажигалка, медицинская диагностика с помощью УЗИ, сканирующая зондовая микроскопия (перемещение зонда с точностью $0,01 \text{ \AA}$).



Вектор поляризации \vec{P} - дипольный момент единицы объёма.

Поверхностная плотность поляризационного заряда

$$\sigma = \vec{P} \cdot \vec{n} = P_n$$

Объёмная плотность поляризационного заряда

$$q_{\text{пол}} = -\oint_S \sigma dS = -\oint_S \vec{P} d\vec{S},$$

$$q_{\text{пол}} = -\int_V \text{div} \vec{P} dV = \int_V \rho_{\text{пол}} dV,$$

$$\rho_{\text{пол}} = -\text{div} \vec{P}.$$

**Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектриках
(в дифференциальной форме)**

$$\mathit{div}\vec{E} = 4\pi\rho = 4\pi(\rho_{св} + \rho_{пол}),$$

$$\mathit{div}\vec{E} = 4\pi(\rho_{св} - \mathit{div}\vec{P}),$$

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P},$$

$$\mathit{div}\vec{D} = 4\pi\rho_{св}$$

\vec{D} - вектор индукции электрического поля

**Теорема Гаусса для электрического поля в диэлектриках
(в интегральной форме)**

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = 4\pi q_{своб}$$

Поляризуемость и диэлектрическая проницаемость

В слабых полях

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}$$

, α

- поляризуемость среды

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} = \vec{E} + 4\pi\alpha\vec{E} = (1 + 4\pi\alpha)\vec{E}$$

$$\varepsilon = 1 + 4\pi\alpha$$

- диэлектрическая проницаемость среды

Диэлектрическая проницаемость «газа» из металлических шариков

$$\vec{p} = R^3 \vec{E}, \quad \vec{P} = n\vec{p} = nR^3 \vec{E},$$

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi nR^3 \vec{E} = (1 + 4\pi nR^3) \vec{E}$$

$$\varepsilon = 1 + 4\pi nR^3$$

Напряжённость электрического поля точечного заряда в среде с постоянной диэлектрической проницаемостью

$$\vec{E} = \frac{q}{\varepsilon r^3} \vec{r}$$

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вещество	ϵ
Вода (20°C)	81
Глицерин	39
Парафин	2,5
Стекло	7
Титанат бария	1250-10000
Резина	7
Воздух	1,00025

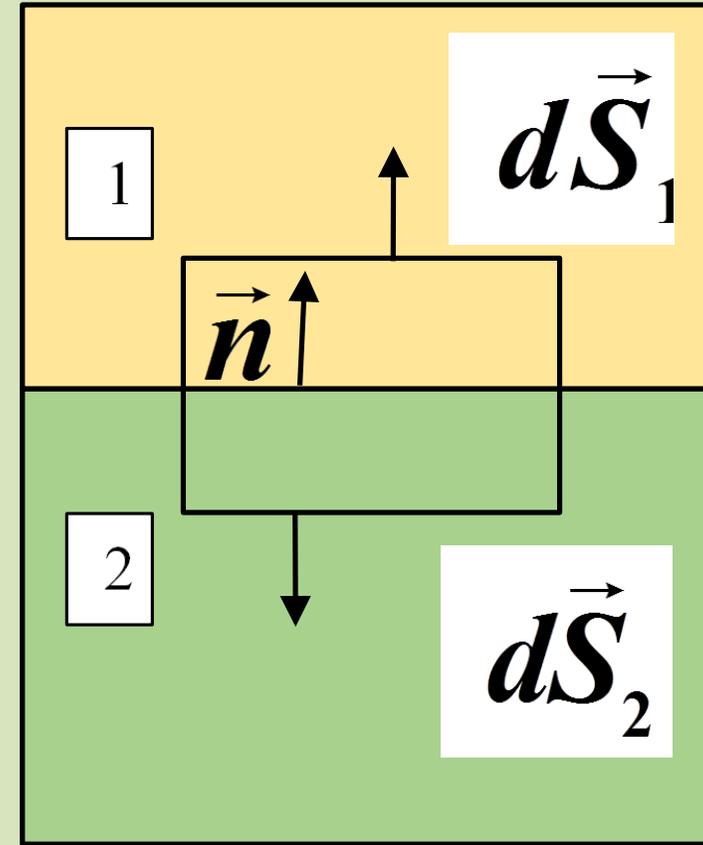
Граничные условия для вектора индукции

Из теоремы Гаусса для нормальных компонент индукции электрического поля по обе стороны от границы раздела

$$D_{1n} - D_{2n} = 4\pi\sigma_{св}$$

D_{1n}, D_{2n} - проекции векторов напряжённости по обе стороны от границы на вектор \vec{n} единичной нормали

σ - поверхностная плотность свободного заряда на границе раздела

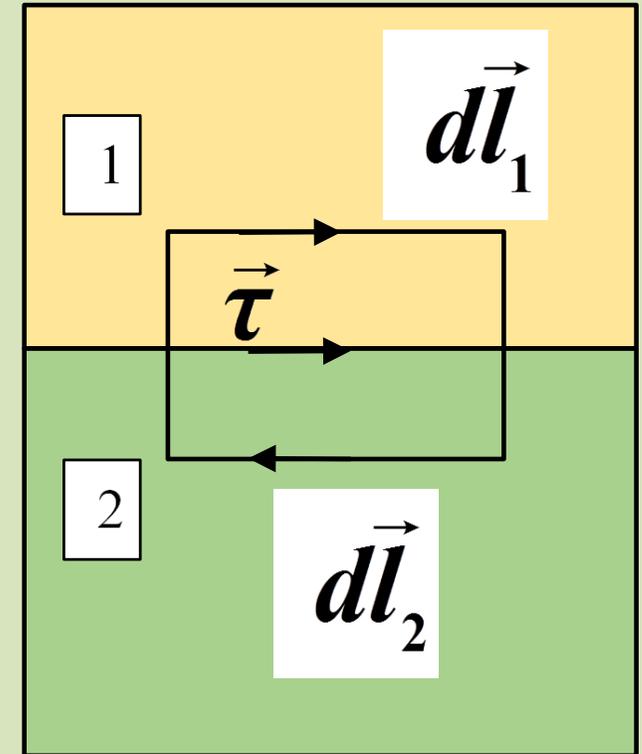


Граничные условия для вектора напряжённости

Из теоремы для тангенциальных (касательных) компонент напряжённости электрического поля по обе стороны от границы

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$

$E_{1\tau}, E_{2\tau}$ - проекции векторов напряжённости по обе стороны от границы на вектор $\vec{\tau}$ единичной касательной



Электрическая ёмкость

Электрическая ёмкость **уединённого проводника**

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

Ёмкость шарика радиуса **R** , находящегося в вакууме

$$\varphi = \frac{q}{r}, \quad C = \frac{q}{\varphi} = R$$

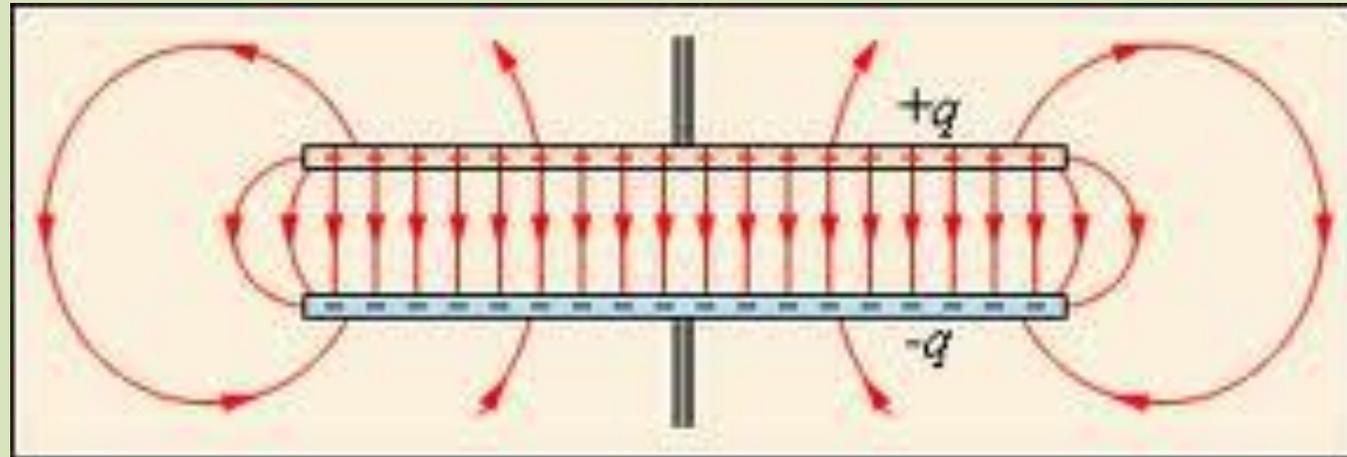
Электрическая ёмкость **конденсатора**.

Конденсатор – система из двух проводников, заряженными одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами

$$\Delta\varphi = \varphi_+ - \varphi_-,$$

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}, \quad q = C \cdot (\varphi_+ - \varphi_-)$$

Электрическая ёмкость **плоского** конденсатора.



$$E = \frac{4\pi q}{\varepsilon S}$$

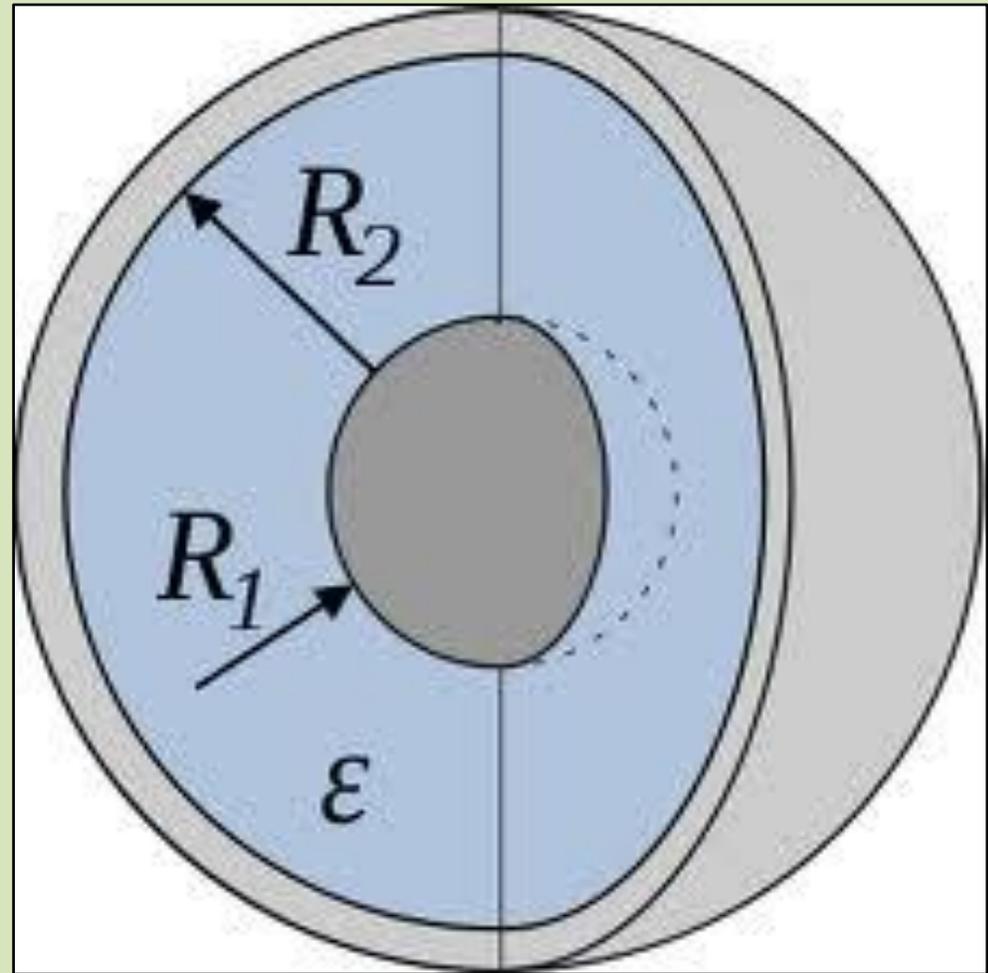
$$\Delta\varphi = \varphi_+ - \varphi_- = Ed = \frac{4\pi q}{\varepsilon S} d$$

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}$$

Электрическая ёмкость сферического конденсатора.

$$\Delta\varphi = \varphi_+ - \varphi_- = \frac{q}{\varepsilon R_1} - \frac{q}{\varepsilon R_2}$$

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$



Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора.

$$E = \frac{2q}{\epsilon r l}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_+ - \varphi_- = \frac{2q}{\epsilon l} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\epsilon l}{2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

