

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

- ❑ Поляризация диэлектриков и основные механизмы.
- ❑ Описание электрического поля в диэлектриках.
- ❑ Проводники в электростатическом поле.
- ❑ Условия равновесия заряда на проводнике.
- ❑ Электроёмкость проводников и конденсаторов.
- ❑ Энергия электрического поля.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ

вещество	концентрация носителей тока, $1/\text{м}^3$
металлы	$10^{28} \div 10^{29}$
диэлектрики	$\sim 10^{17}$
полупроводник	$10^{21} \div 10^{23}$

- В диэлектриках нет свободных зарядов (их концентрация много меньше, чем в проводниках);
- В диэлектриках существуют **связанные заряды** (заряды внутри атомов и молекул), способные смещаться на незначительные расстояния.

Поляризация диэлектриков

Поляризация – смещение связанных зарядов из своих положений равновесия на малые расстояния порядка атомных при внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле.

В соответствии с механизмом поляризации диэлектрики делятся три класса:

диэлектрики	механизм поляризации
неполярные	электронный
полярные	ориентационный
ионные кристаллы	ионный

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ

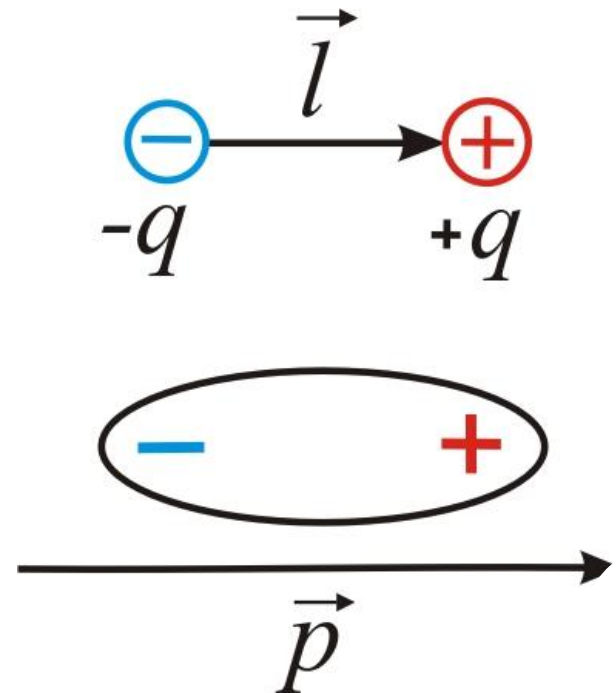
Электрический диполь – система из двух одинаковых по модулю разноименных точечных зарядов $+q$ и $-q$, находящихся на расстоянии l друг от друга.

Электрический дипольный момент:

$$\boxed{p = ql}$$

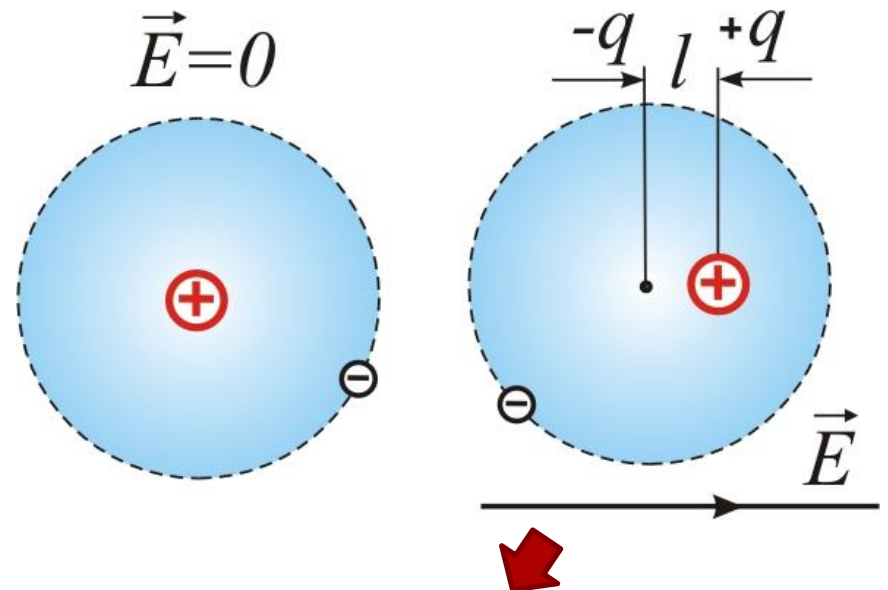
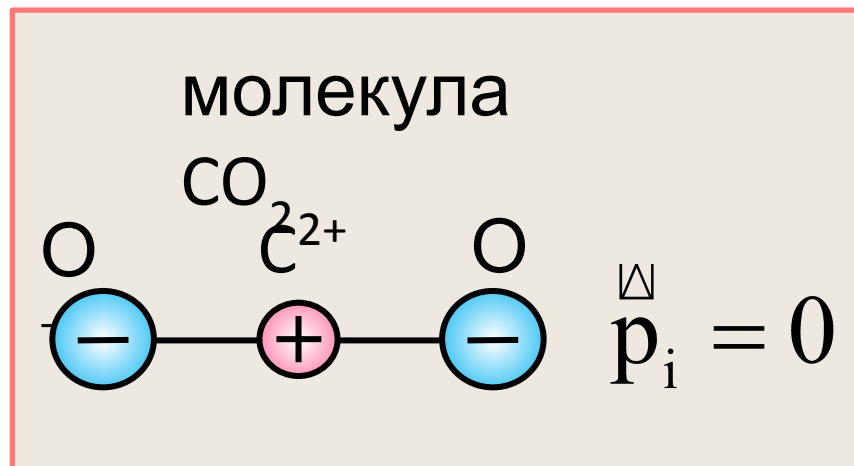
$$\boxed{[Кл \cdot м]}$$

l – плечо диполя



ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕХАНИЗМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Неполярные молекулы - симметричные молекулы (H_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , N_2 , Ar, Ne), в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.



В электрическом поле неполярные молекулы превращаются в диполи, из-за смещения электронной оболочки под действием поля.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕХАНИЗМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

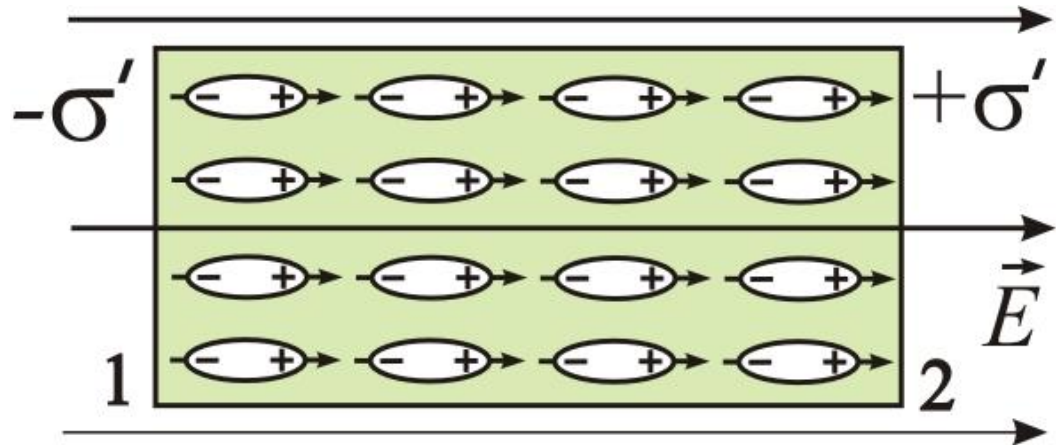
В отсутствие электрического поля:

$$\sum_{\Delta V}^{\mathbb{N}} p_i = 0$$

В электрическом поле: диполи ориентированы одинаково.

↓

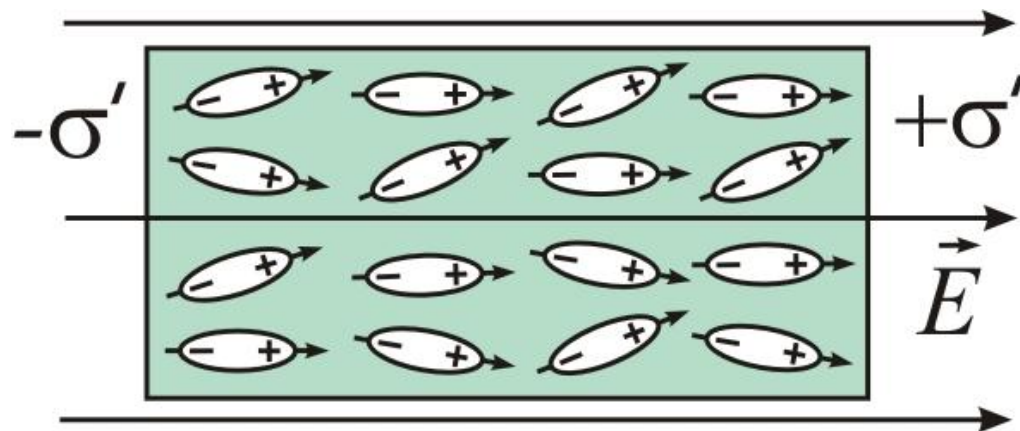
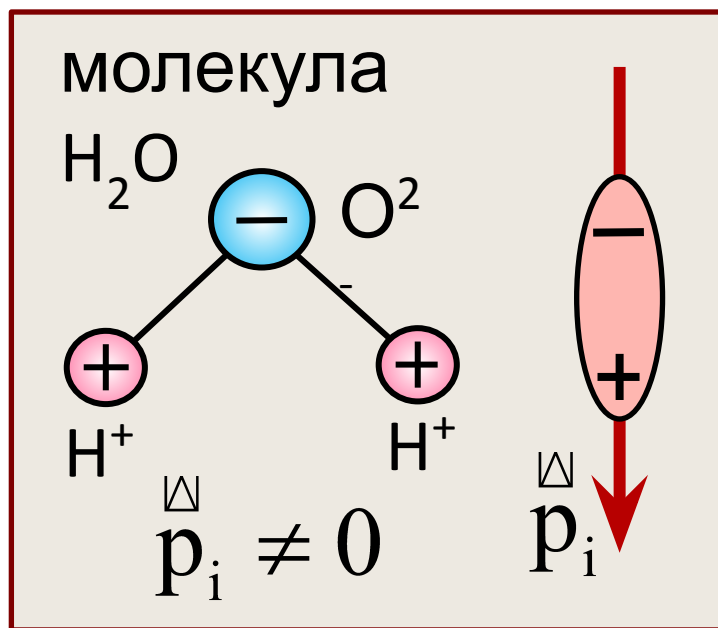
$$\sum_{\Delta V}^{\mathbb{N}} p_i \neq 0$$



$\pm\sigma'$ —поверхностная плотность связанных зарядов

ОРИЕНТАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Полярные молекулы - несимметричные молекулы (CO , H_2O , NH , NH_3 , HF , HCl), в которых центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещены друг относительно друга.



$$\vec{E} = 0 \rightarrow \sum \vec{p}_i = 0$$

$$\vec{E} \neq 0 \rightarrow \sum_{\Delta V} \vec{p}_i \neq 0$$

$$p_i = 10^{-29} - 10^{-30}$$

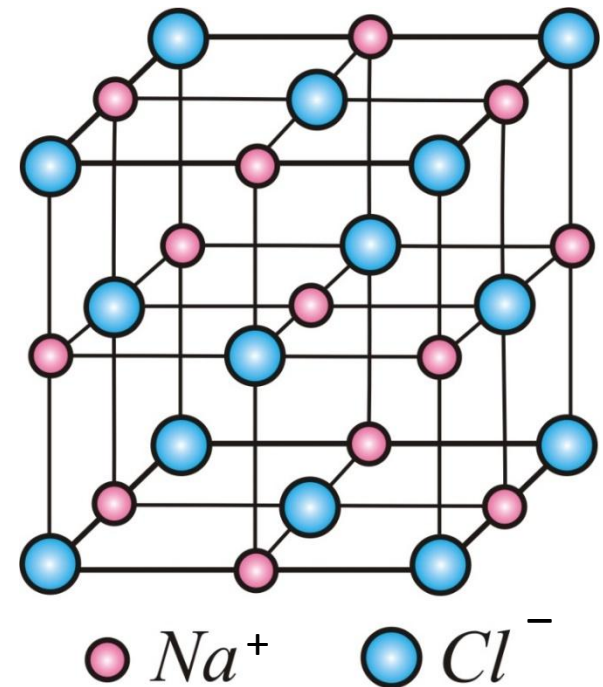
Кл · м

ИОННЫЙ МЕХАНИЗМ

Ионные кристаллы – кристаллы (KF, KCl, NaCl), состоящие из чередующихся ионов противоположного знака.

Такой кристалл можно рассматривать как две кристаллические подрешетки, состоящие из ионов одного знака, вставленные друг в друга.

- В электрическом поле эти решетки смещаются в противоположные стороны.



ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Вне зависимости от механизма, процесс поляризации сопровождается:

- Появлением связанных зарядов на противоположных поверхностях и не скомпенсированным дипольным моментом:
$$\sum_{\Delta V} \vec{p}_i \neq 0$$

- Связанные заряды создают свое электрическое поле E' , противоположное внешнему полю:

$$\vec{E}' \uparrow \downarrow \vec{E} \quad \rightarrow$$

- Напряженность поля внутри диэлектрика меньше, чем напряженность внешнего поля.

ОПИСАНИЕ ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Вектор поляризованности - суммарный дипольный момент, приходящийся на единицу объема вещества.

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{p}_i \quad [1] \quad [\text{Кл/м}^2]$$

Опыт: У изотропных однородных диэлектриков любого типа поляризованность связана с напряженностью поля в той же точке соотношением:

$$\vec{P} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \quad [2]$$

ε – **относительная диэлектрическая восприимчивость** (безразмерная величина) –

ОПИСАНИЕ ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

 Большинство газов:

$$\epsilon = 0,0001 \div 0,001$$

 Большинство жидких и твердых диэлектриков:

$$\epsilon = 1 \div 10$$

 Сегнетоэлектрики:

$$\epsilon \gg 1$$



вещество	ϵ
воздух	0,00025
вода	80
этиловый спирт	24
плексиглас	2,5
фарфор	3,6
сегнетова соль	500
BaTiO ₃	2000

Существуют диэлектрические кристаллы, сегнетоэлектрики, для которых ϵ не применима, а ϵ зависит от напряженности поля.

ОН-

ОПИСАНИЕ ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Вектор электрической индукции

(электрическое поле)

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad [3] \quad [\text{Кл/м}^2]$$

[2], [3]  $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$ [4]

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

в вакууме $\varepsilon =$

ε - относительная диэлектрическая проницаемость.

Теорема Гаусса для вектора $\vec{D}$: Поток вектора через любую замкнутую поверхность S равен суммарному **свободному** заряду q , находящемуся в объёме, ограниченном поверхностью S :

$$\oint_S (\vec{D}, d\vec{S}) = q \quad [5]$$

ОПИСАНИЕ ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Если однородный и изотропный диэлектрик полностью заполняет объём, ограниченный эквипотенциальными поверхностями поля свободных зарядов, то напряжённость поля свободных зарядов и напряжённость поля связанных зарядов направлены вдоль одной прямой. В этом случае величина внутри диэлектрика в ϵ раз меньше, чем была бы в его отсутствие, т.е. в вакууме.

Например, для 2-х точечных зарядов в однородном жидком безграничном диэлектрике:

$$F_{\text{кл}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$$

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРОВОДНИКАХ

Проводники - вещества, в которых имеются свободные заряды, способные в пределах тела перемещаться на какие угодно расстояния.

Для равновесия зарядов на проводнике необходимо выполнение следующих условий:

- Напряжённость поля всюду в проводнике должна быть равна нулю:

$$E = 0$$

- Потенциал всех точек проводника должен быть одинаковым:

$$\varphi = const$$

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРОВОДНИКАХ

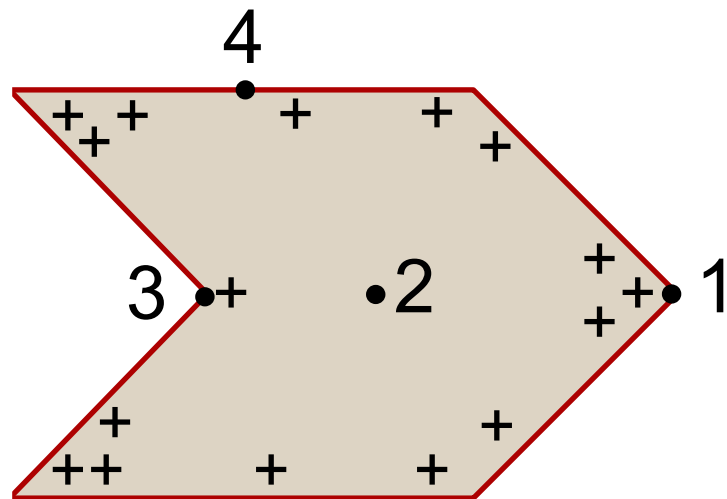
Рассмотрим заряженный проводник сложной формы.



$$E_2 = 0$$



$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4$$

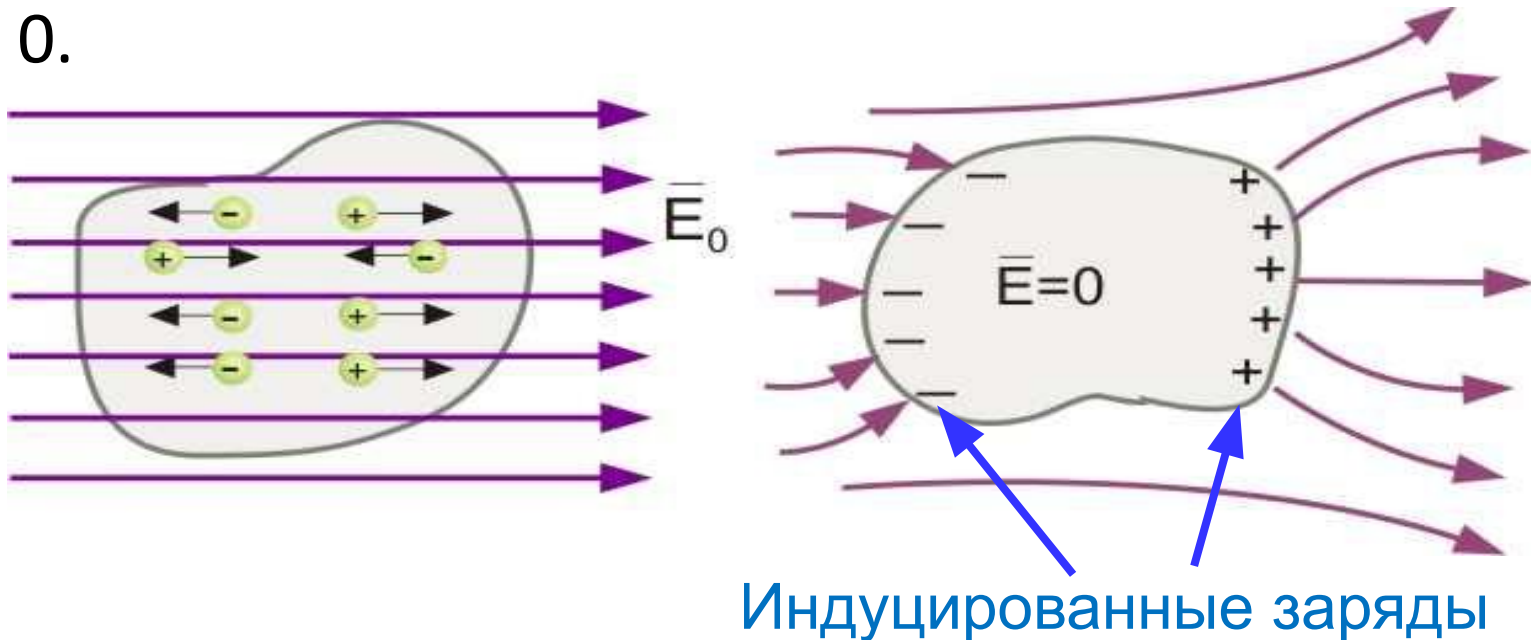


Поверхностная плотность заряда будет больше на выпуклых участках проводника (с малым радиусом кривизны) и меньше – на вогнутых участках:

$$\sigma_1 > \sigma_4 > \sigma_3; \quad \sigma_2 = 0$$

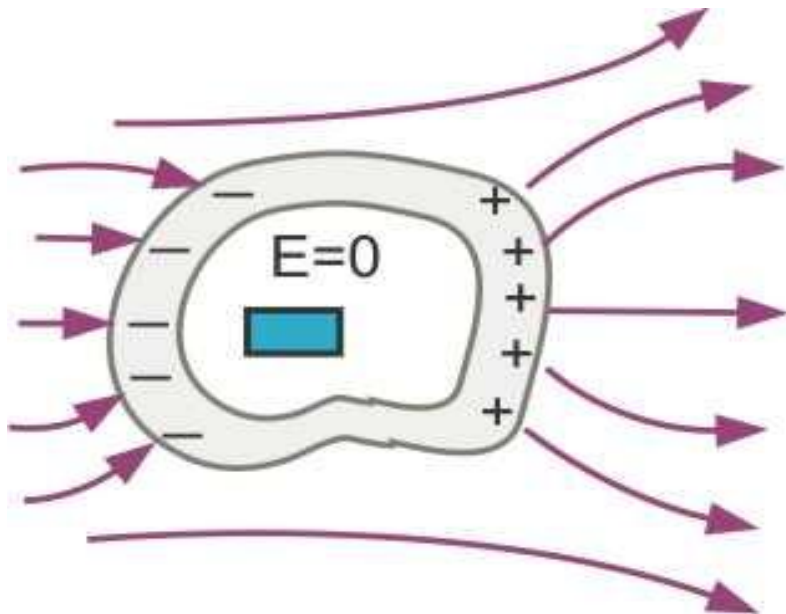
ПРОВОДНИК ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Явление электростатической индукции - перераспределение зарядов по поверхности проводника при его внесении во внешнее электрическое поле. Перераспределение происходит таким образом, что внутри проводника $E = 0$.



ПРОВОДНИК ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Электростатическая защита: предмет, находящийся внутри проводящей полости, защищён от влияния внешнего электрического поля.



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ
ЗАЩИТА

ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ УЕДИНЁННОГО ПРОВОДНИКА

Для заряженного проводника $\varphi \propto q \rightarrow$

Отношение заряда проводника к его потенциалу q/φ является величиной постоянной, не зависящей от q .

Электроёмкость уединённого проводника численно равна заряду, изменяющему потенциал проводника на единицу:

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad [6]$$

$$1 \text{ Фарада (Ф)}, \\ 1\text{Ф} = 1\text{Кл}/1\text{В}$$

Электроёмкость уединённого проводника зависит от его размеров, формы и диэлектрических свойств окружающей среды.

ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Ёмкость проводника очень мала, но её можно увеличить, если к нему приблизить другое тело.

Конденсатор - совокупность двух проводников, находящихся на малом расстоянии друг от друга и разделённых слоем диэлектрика.

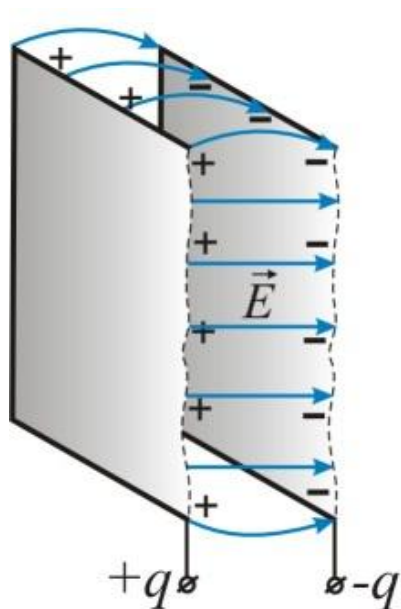
Электроёмкость конденсатора – это физическая величина, численно равная отношению заряда q (по абсолютному значению) на одной из обкладок к разности потенциалов между ними

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad [\Phi] \quad [7]$$

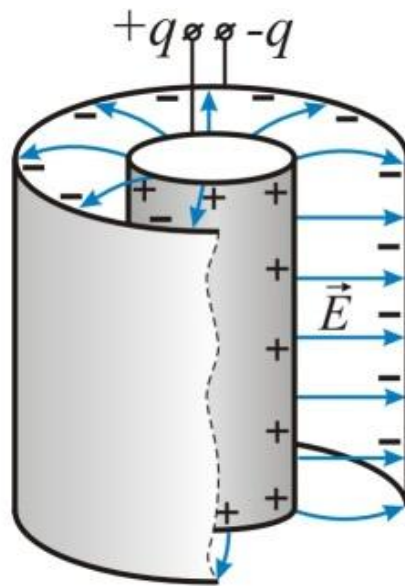
ЁЛЕКТРОЁМККОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Ёмкость конденсатора зависит от:

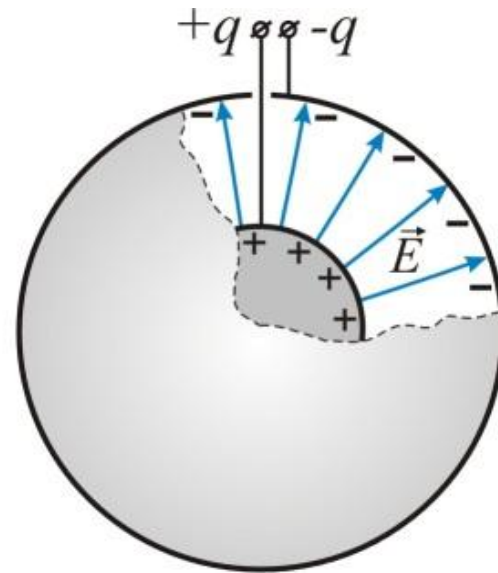
- формы и размеров обкладок,
- величины зазора между ними;
- диэлектрических свойств диэлектрика, между обкладками.



плоский



цилиндрический

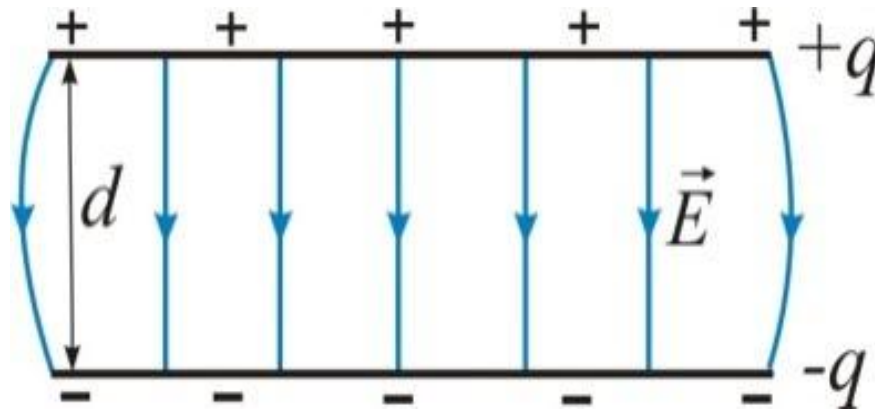


сферический

Ёмкость плоского конденсатора

Идеальный
конденсатор:

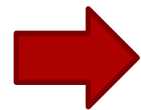
$$\vec{E} = \text{const}$$



$$q = \sigma S$$

$$U = Ed$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0}$$



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



$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

[8]

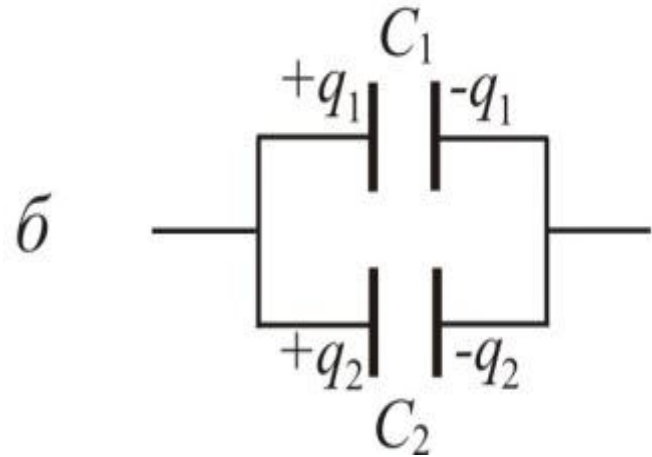
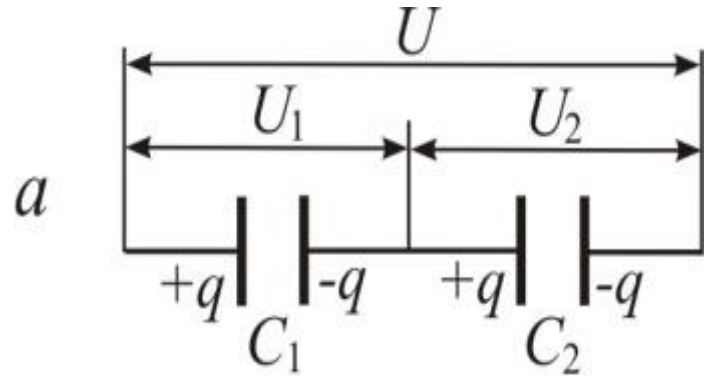
S – площадь каждой из
обкладок

СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В БАТАРЕИ

а) последовательное соединение:

$$\left. \begin{array}{l} q = q_1 = q_2 \\ U = U_1 + U_2 \end{array} \right\} \rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$



б) параллельное соединение:

$$\left. \begin{array}{l} q = q_1 + q_2 \\ U = U_1 = U_2 \end{array} \right\} \rightarrow C = C_1 + C_2$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

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

- энергия взаимодействия двух точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^N \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i$$

- энергия взаимодействия N- точечных зарядов

$$\varphi_i = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}}$$

- потенциал поля, создаваемый в месте нахождения заряда q_i всеми остальными зарядами

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Энергия уединённого заряженного проводника:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \Delta q_i \varphi_i = \frac{1}{2} \varphi \sum_{i=1}^N \Delta q_i = \frac{1}{2} \varphi q \quad [9]$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{1}{2} [(+q)\varphi_1 + (-q)\varphi_2] = \frac{1}{2} q(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{2} qU$$



$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad [10]$$

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электромагнитные волны переносят энергию



Носителем электрической энергии является само поле (электрическое и магнитное)

В случае плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \Rightarrow W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d} = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 V$$

Объёмная плотность энергии – энергия, приходящаяся на единицу объёма электрического поля:

$$\omega = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \quad [11] \quad [\text{Дж/м}^3]$$