

Электрическое поле в веществе

В зависимости от концентрации свободных зарядов вещества делятся на следующие виды

ПРОВОДНИКИ	ДИЭЛЕКТРИКИ	ПОЛУПРОВОДНИКИ
<ul style="list-style-type: none">- это вещества, которые хорошо проводят электрический ток- высокая концентрация свободных зарядов	<ul style="list-style-type: none">- это вещества, которые не проводят электрический ток- свободные заряды практически отсутствуют	<ul style="list-style-type: none">- занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками

Диэлектрики в электрическом поле

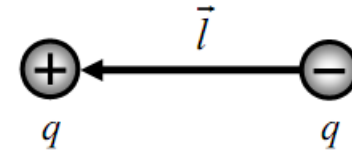
У диэлектриков электроны связаны с атомами. Под действием электрического поля связанные электроны могут перемещаться только в пределах атомов или молекул. Во внешнем электрическом поле атомы и молекулы диэлектрика ведут себя как **диполи**.

Диполь - система из двух одинаковых по величине, но разных по знаку точечных электрических зарядов, находящихся на расстоянии значительно меньшем, чем расстояния до точек, в которых определяется поле этой системы.

Дипольный момент – вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и равный произведению модуля заряда на расстояние между зарядами.

$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

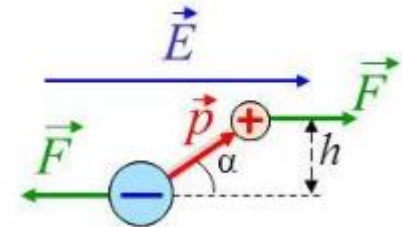
\vec{l} - плечо диполя



- дипольный момент
(характеризует поведение диполя в эл. поле)

Во внешнем поле на **диполь** действует пара сил, создающих момент сил, под действием которого **диполь** ориентируется по полю, т.е. поворачивается так, чтобы

$$\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{E}$$



Поэтому во внешнем поле диэлектрик **поляризуется**, т.е. приобретает **дипольный момент**

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$$

\vec{p}_i – дипольный момент одной молекулы.

КОЛИЧЕСТВЕННО степень поляризации характеризует **вектор поляризации** или **поляризованность**

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{p}_i$$

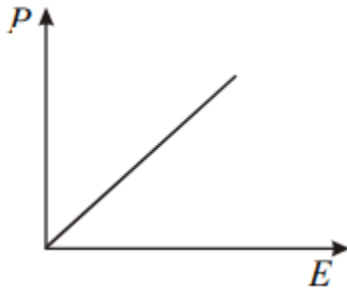
- вектор поляризации;

$$[P] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$$

дипольный момент всех молекул в объёме V

дипольный момент одной молекулы

Поляризованность (\vec{P}) – векторная физическая величина, численно равная дипольному моменту единицы объёма диэлектрика.



В слабых полях поляризованность изотропных диэлектриков пропорциональна напряжённости электрического поля

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

χ – **диэлектрическая восприимчивость среды** – величина, характеризующая электрические свойства диэлектрика

Диэлектрическая восприимчивость χ величина безразмерная, всегда положительная, для большинства диэлектриков численное значение составляет несколько единиц. Для вакуума $\chi = 0$, так как вакуум не может поляризоваться.

Если диэлектрик состоит из полярных молекул, то действию внешнего поля противодействует тепловое движение, которое стремится разбросать их дипольные моменты по всем направлениям. Диэлектрическая восприимчивость таких диэлектриков обратно пропорциональна температуре.

В зависимости от механизма выделяют следующие **типы поляризации диэлектриков** :

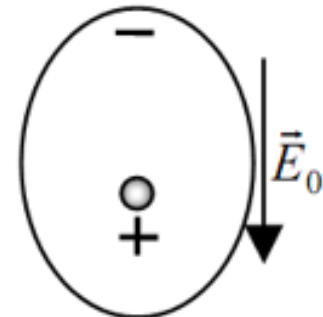
1 – электронная или деформационная поляризация - наблюдается у **неполярных диэлектриков**.

Неполярные диэлектрики состоят из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.

$$\vec{E}_0 = 0$$



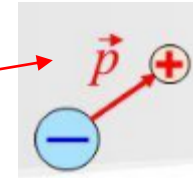
Под действием внешнего электрического поля происходит смещение электронных оболочек атомов



2 - ориентационная поляризация — наблюдается у полярных диэлектриков

Полярные диэлектрики состоят из атомов или молекул, которые имеют асимметричное строение, т.е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают.

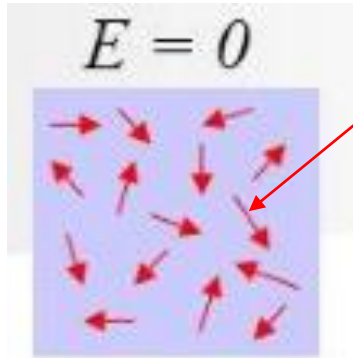
Молекулы такого диэлектрика являются **диполями**



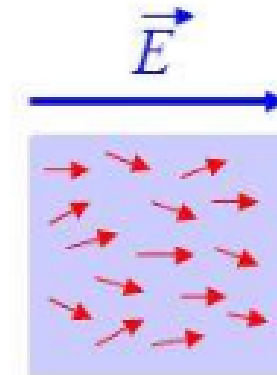
$$\vec{E}_0 \neq 0$$



Ориентация диполей во внешнем электрическом поле у полярных диэлектриков



Если такой диэлектрик поместить во внешнее поле, то силы этого поля будут стремиться **повернуть диполи вдоль поля** и в результате возникнет отличный от нуля результирующий момент.

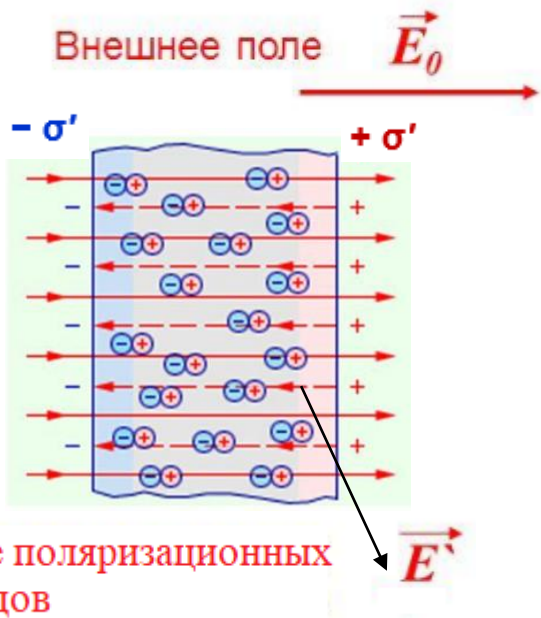


2 – ионная поляризация — наблюдается у **ионных диэлектриков**

Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков (например, NaCl, KCl, KBr). В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а рассматривать их можно как **систему двух вдвинутых одна в другую ионных подрешеток**.

При наложении на ионный кристалл электрического поля происходит некоторая деформация кристаллической решетки или **относительное смещение подрешеток, приводящее к возникновению дипольных моментов**.

Поле внутри диэлектрика



В результате поляризации на левой грани диэлектрика образуется избыток отрицательных поляризационных (связанных) зарядов с поверхностной плотностью $-\sigma'$. На правой грани – избыток положительных с поверхностной плотностью $+\sigma'$. Связанные заряды создают дополнительное электрическое поле напряжённостью \vec{E}'

Суммарное поле в диэлектрике:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

Направления полей

Внешнее поле
(в вакууме) \vec{E}_0

Поле поляризационных
зарядов \vec{E}'

Суммарное поле:
(в диэлектрике) \vec{E}

$$\vec{E}_0 = \varepsilon \vec{E}$$

Электрическое смещение
(электрическая индукция):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$$

По модулю:

$$E = E_0 - E'$$

$$\vec{E} < \vec{E}_0 (!)$$

Дополнительное макроскопическое поле, созданное в диэлектрике поляризационными зарядами направлено против внешнего поля и ослабляет его.

$E_i = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}$ - напряженность поля, созданного в диэлектрике поляризационными зарядами

Поверхностная плотность связанных зарядов равна поляризованности. $P = \sigma'$

Напряженность поля в диэлектрике: $E = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \epsilon_0 E}{\epsilon_0}$

$$E = E_0 - \chi E$$

Отсюда $E = \frac{E_0}{1 + \chi}$
Безразмерная величина $\epsilon = 1 + \chi$
называется диэлектрической проницаемостью среды.
Тогда напряжённость поля внутри диэлектрика

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

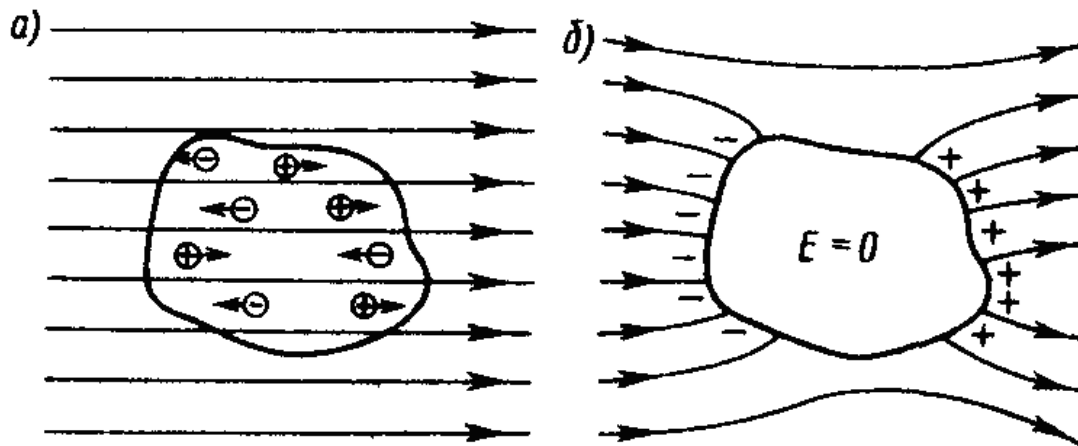
Диэлектрическая проницаемость среды – характеристика вещества, которая показывает, во сколько раз поле внутри однородного диэлектрика меньше, чем в вакууме.

Таким образом, диэлектрик всегда ослабляет электрическое поле.

Проводники в электростатическом поле

Свободные электроны в металлах могут перемещаться по всему объему металла.

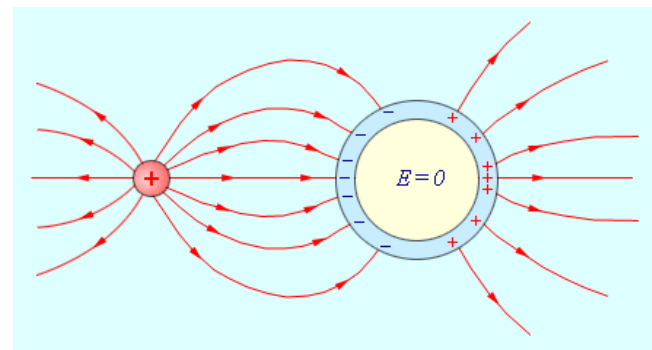
Если поместить металлический проводник во внешнее электростатическое поле, то свободные электроны будут смещаться против поля до тех пор, пока не установится такое распределение зарядов, при котором $\vec{E} = 0$.



Явление **разделения разноимённых зарядов** в проводнике, помещённом **в электрическое поле называют электростатической индукцией.**

1. Заряды проводника в электростатическом поле перемещаются пока не установится состояние равновесия. Причем это происходит практически мгновенно.
2. **Напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю**, иначе бы на заряды действовала бы сила, и они пришли бы в движение.
3. Потенциал во всех точках внутри проводника постоянен ($\varphi = \text{const}$), т.е. **поверхность проводника в электростатическом поле является эквипотенциальной**.

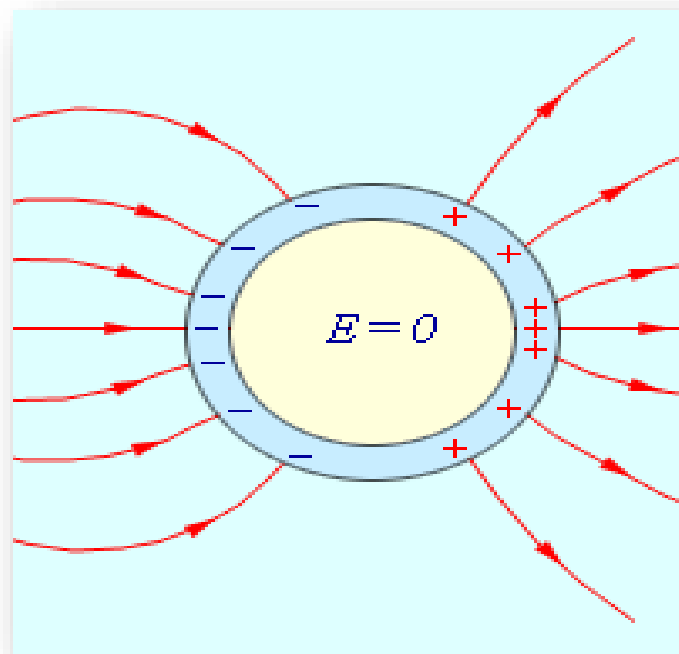
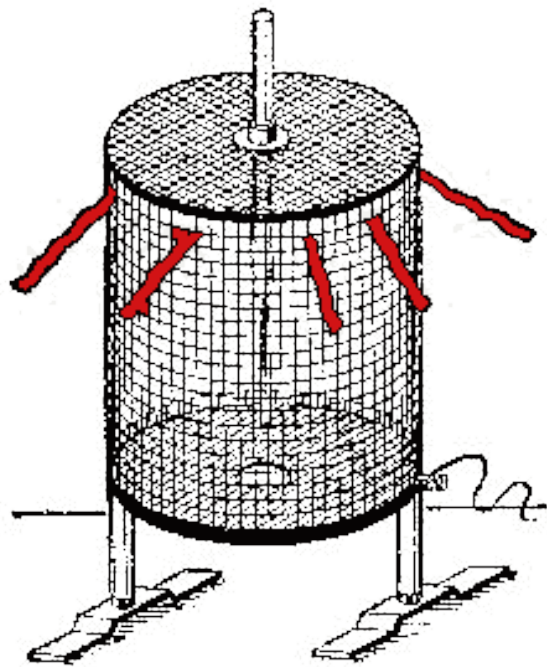
4. **Вектор напряженности поля на внешней поверхности проводника направлен по нормали к каждой точке его поверхности.**



5. Если проводнику сообщить некоторый заряд Q , то uncompensated charges are distributed only on the surface of the conductor. This follows directly from Gauss's theorem and the fact that the field inside the conductor is zero.
6. Напряженность электростатического поля у поверхности проводника определяется поверхностной плотностью зарядов.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

Все внутренние области проводника, внесенного в электрическое поле, остаются электронейтральными. Если удалить некоторый объем, выделенный внутри проводника, и образовать пустую полость, то электрическое поле внутри полости будет равно нулю. На этом основана **электростатическая защита** – чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния поля помещают в металлические ящики



Электроемкость уединенного проводника и конденсатора

Величину

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

называют **электроемкостью уединенного проводника**.

Электроемкость зависит от размеров и формы проводника.

Единица электроемкости в системе СИ: **фард (Ф)**

$$[C] = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1\text{Ф}$$

Пример. Найдем электроемкость уединенного проводника, имеющего форму шара радиуса R .

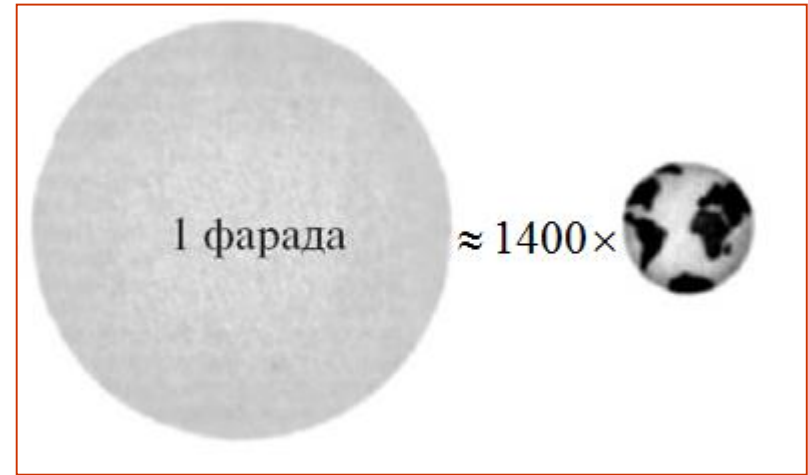
Для этого зарядим проводник зарядом q и вычислим его потенциал φ :

$$\varphi = \int_R^{\infty} E dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_R^{\infty} \frac{q dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}.$$

Тогда

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{q 4\pi\epsilon_0 R}{q} = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (3.2)$$

- **Емкость сферы размерами с Землю равна всего 709 мкФ.**
- **Емкость сферы равна 1 Ф, если радиус сферы в 1400 раз больше радиуса Земли, т.е. $R = 9 \cdot 10^{12}$ м.**

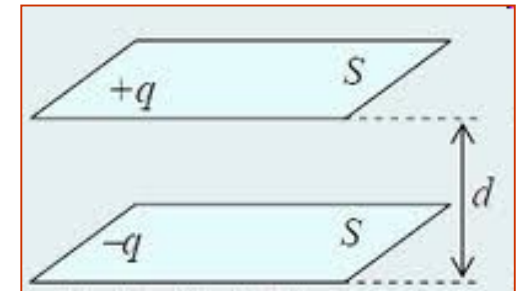


Конденсаторы — это устройства, которые состоят из двух или более проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика.

Проводники, из которых состоит конденсатор, называются *обкладками*.

Емкостью конденсатора называют отношение заряда на положительно заряженной обкладке к разности потенциалов между обкладками (эту разность потенциалов называют напряжением):

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}.$$



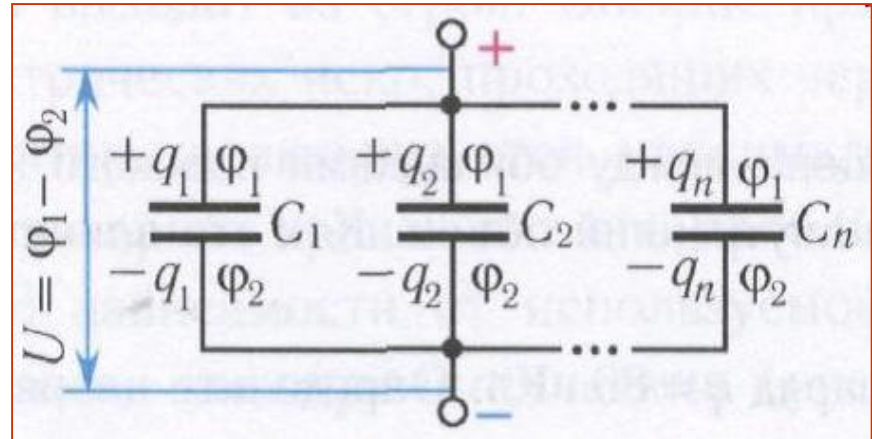
Соединения конденсаторов

Для получения необходимой емкости конденсаторы соединяют между собой в батареи, применяя при этом параллельное, последовательное и смешанное соединения.

• Параллельное соединение

Общий заряд равен алгебраической сумме зарядов каждой из обкладок отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$



Т.к. соединенные обкладки представляют собой один проводник, то потенциалы всех соединенных в один узел обкладок одинаковы и разность потенциалов между обкладками всех конденсаторов одинакова: $U_1 = U_2 = U_3 = U$.

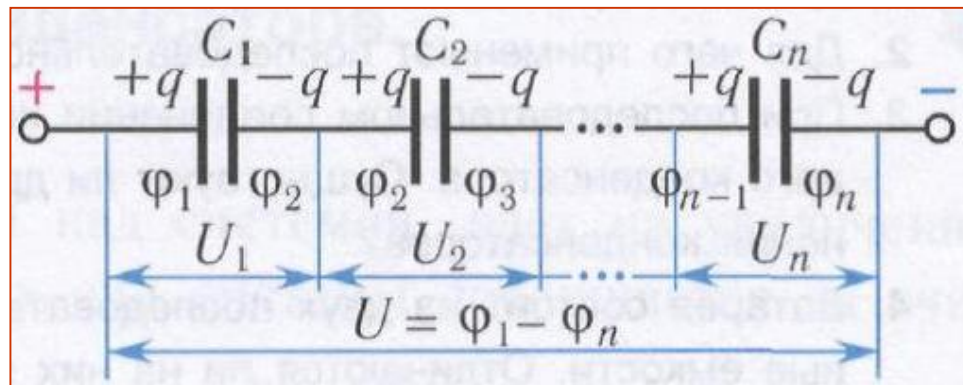
Т.к. $q = CU$, $q_1 = C_1U$, $q_2 = C_2U$, $q_3 = C_3U$, то

$$C_{\text{пар.}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$$

• Последовательное соединение

$$q = q_1 = q_2 = q_n,$$

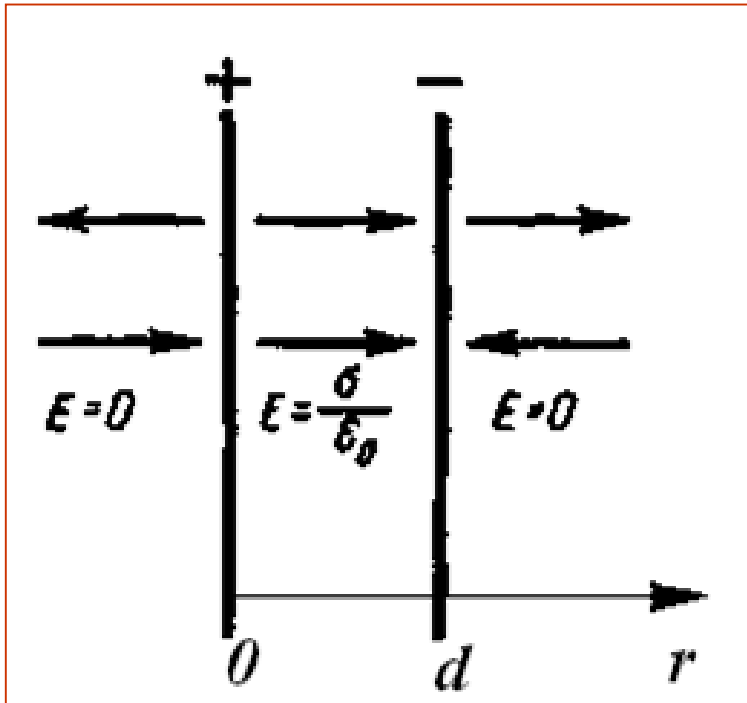
$$U = U_1 + U_2 + U_n.$$



Т.к. $U = \frac{q}{C}, U_1 = \frac{q}{C_1}, U_2 = \frac{q}{C_2}, U_n = \frac{q}{C_n},$ то

$$\frac{1}{C_{\text{посл.}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Емкость плоского конденсатора



Плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин, разделенных зазором шириной d .

Если заряд конденсатора q , то напряженность поля, создаваемого каждой из пластин равна по модулю:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}$$

результатирующая напряженность поля между обкладками:

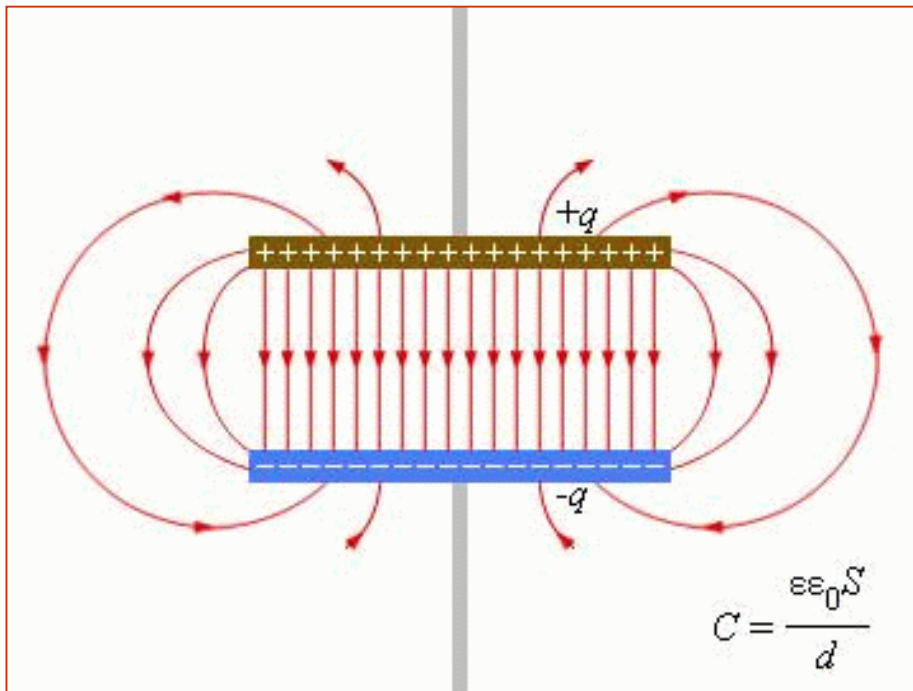
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}, \text{ где } \sigma = q/S.$$

Тогда разность потенциалов между пластинами:

$$U = \int_0^d E dr = \int_0^d \frac{q dr}{\epsilon_0 \epsilon S} = \frac{q d}{\epsilon_0 \epsilon S}.$$

Емкость плоского конденсатора определяется:

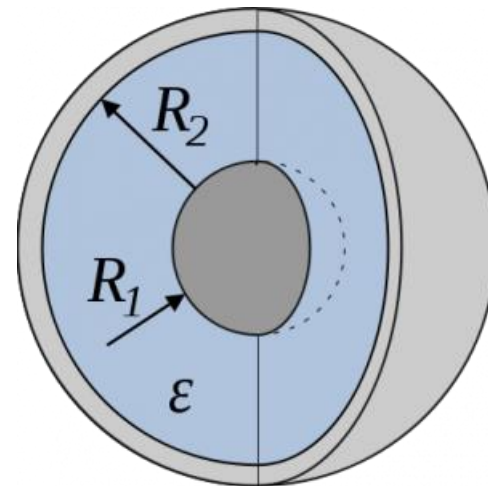
$$C = \frac{q}{U} = \frac{q \epsilon_0 \epsilon S}{q d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$



*Электрическое поле
плоского конденсатора*

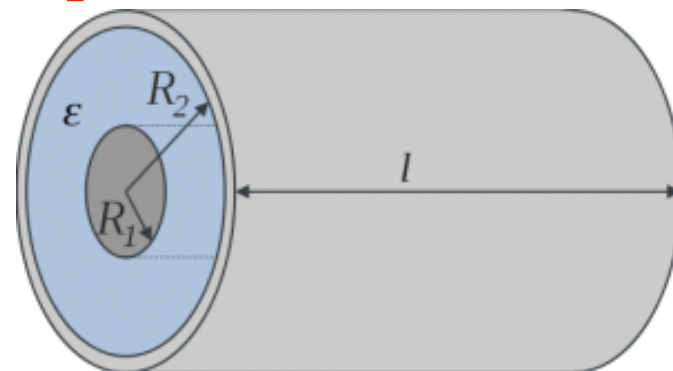
Емкость **сферического конденсатора**:

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



Емкость **цилиндрического конденсатора**:

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



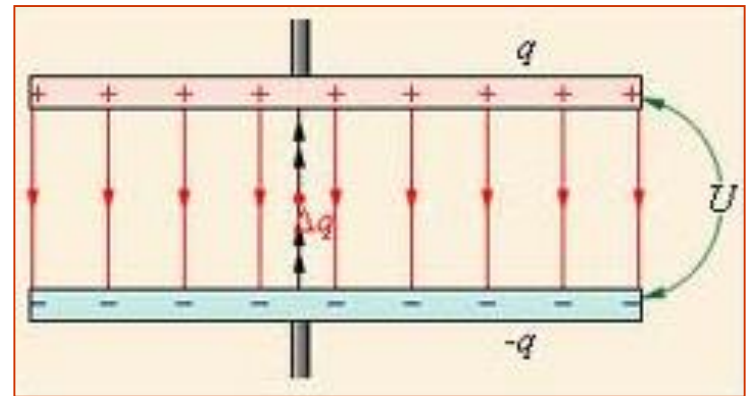
где l - длина конденсатора, R_1 и R_2 - радиусы внутренней и наружной обкладок цилиндрических обкладок.

Т.о., емкость конденсатора зависит от размеров и формы обкладок, от зазора между ними и от заполняющей конденсатор среды.

Энергия заряженного конденсатора

Пусть имеется конденсатор емкости C , заряженный до напряжения U . Для того, чтобы перенести на него добавочный заряд dQ требуется совершить работу $dA = UdQ$; но в конденсаторе заряд и напряжение связаны соотношением $Q = CU$, дифференцируя которое, получим $dQ = CdU$. Тогда $dA = CUdU$, и полная работа, которую надо совершить для заряда конденсатора:

$$A = \int_0^U CUdU = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU}{2}.$$



Эта работа идет на создании энергии электрического поля конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

Учтем, что объем конденсатора $V = Sd$, тогда можно ввести величину **плотность энергии**: $w = \frac{W}{V}$.

Подставим в формулу (3.6) выражение для емкости плоского конденсатора и учтем, что $U = Ed$, $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$, и находим:

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2d} SE^2 d^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} E^2 V ; \quad w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} . \quad (3.7)$$

Применение конденсаторов

Конденсаторы находят широкое применение во многих областях радио- и электротехники.

- При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах и т. п.
- Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.
- Емкость конденсатора заметно изменяется при малейших изменениях параметра конденсатора. Так малое изменение расстояния между обкладками учитывается в *измерителях малых перемещений*, изменение состава диэлектрика при изменении влажности фиксируется в *измерителях влажности*, учет изменения высоты диэлектрика между обкладками конденсатора позволяет *измерять уровень жидкости* и т.п.
- Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.