

Тема: Проводники и диэлектрики в электростатическом поле.

Конденсаторы

Д/З 15-30 Сав, 15.1 – 17.3 Д-Я

План:

1. Проводники в электростатическом поле.
2. Диэлектрики в электростатическом поле.
3. Поляризованность. Напряжённость электрического поля в диэлектрике.
4. Электрическое смещение.
5. Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
6. Ёмкость уединённого проводника.
7. Конденсаторы.
8. Ёмкость конденсатора.
9. Энергия электрического поля уединённого проводника и конденсатора.

Проводники в электростатическом поле

Проводниками называются вещества, которые при обычных условиях хорошо проводят электрический ток. (это объясняется наличием в веществе большого количества свободных зарядов)

Свободными зарядами называются заряженные частицы, способные перемещаться под действием электрического поля.

Пример проводников: металлы, электролиты, ионизированные газы.

Носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. Их концентрация велика – порядка 10^{28} м^{-3} .

Эти электроны участвуют в беспорядочном тепловом движении. Под действием электрического поля они начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью 10^{-4} м/с .

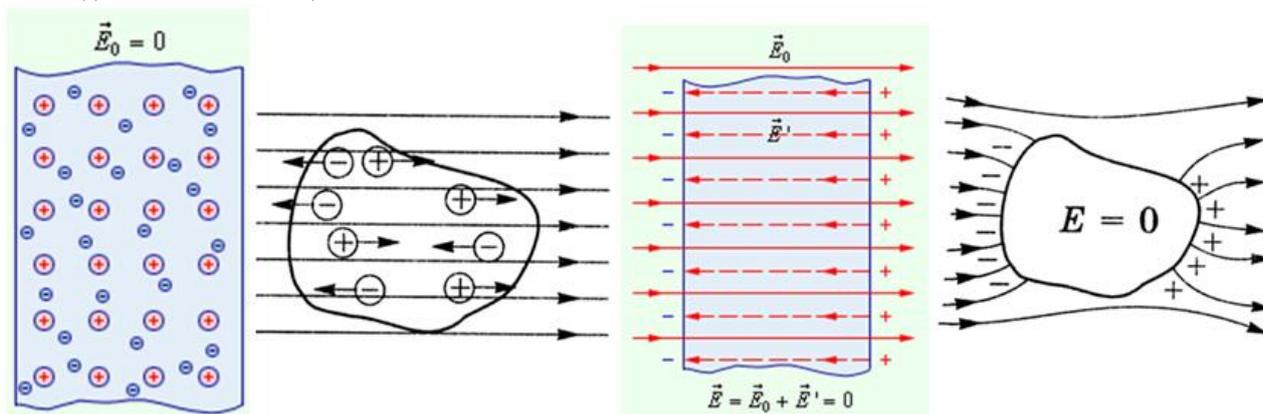
В электролитах носителями тока являются положительно и отрицательно заряженные ионы, а в ионизированных газах – свободные электроны, а так же положительно и отрицательно заряженные ионы.

При внесении металлического проводника в электростатическое поле, свободные электроны проводника смещаются вдоль силовых линий и располагаются на его поверхности.

На одной стороне проводника окажется недостаток электронов и она зарядится положительно, на другой стороне избыток электронов и она зарядится отрицательно. Такой способ электризации тел называется **электростатической индукцией (или электризацией влиянием)**. Электростатической индукцией объясняется притяжение предметов к наэлектризованным телам.

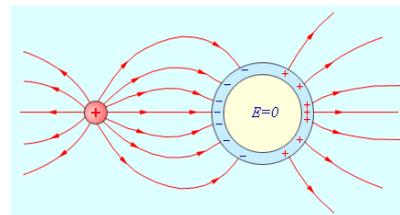
Важной особенностью индуцированных зарядов проводника является возможность их механического разделения.

Заряды внутри проводника создают своё электрическое поле, направленное навстречу внешнему. Накопление свободных электронов на одном из концов проводника будет происходить до тех пор, пока внутреннее электрическое поле не скомпенсирует внешнее, в результате чего напряжённость результирующего поля станет равной нулю (то есть при равновесии зарядов на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет. Это приводит к тому, что весь проводник (и поверхность и его внутренняя область) приобретает один и тот же потенциал.

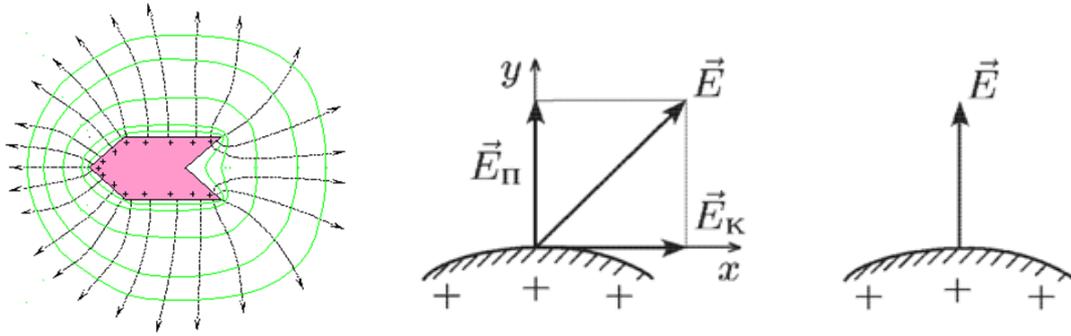


Таким образом:

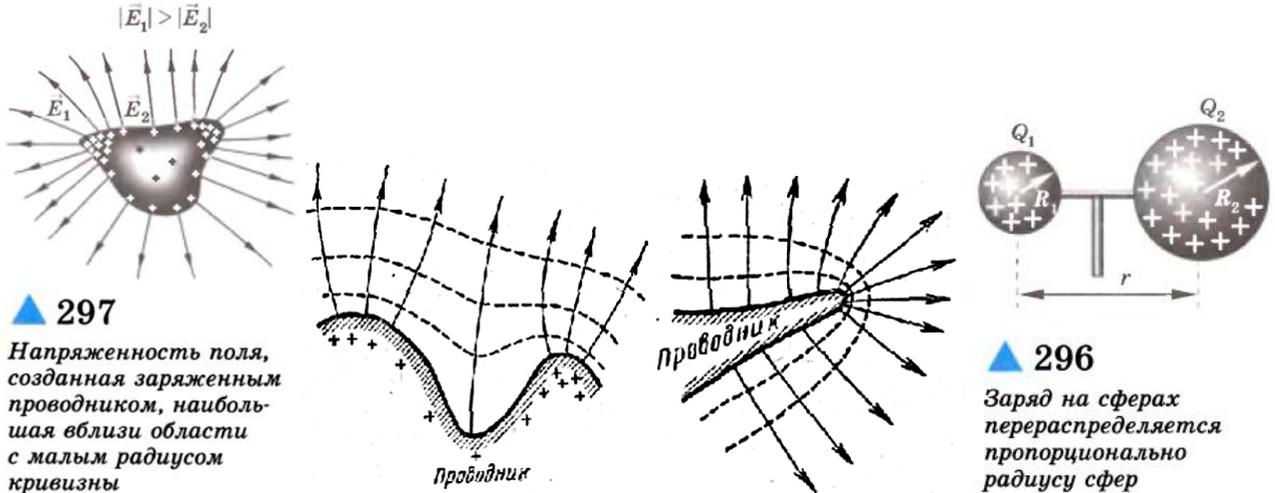
1. при равновесии заряда на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет и весь проводник (поверхность и его внутреннее пространство) приобретает один и тот же потенциал;



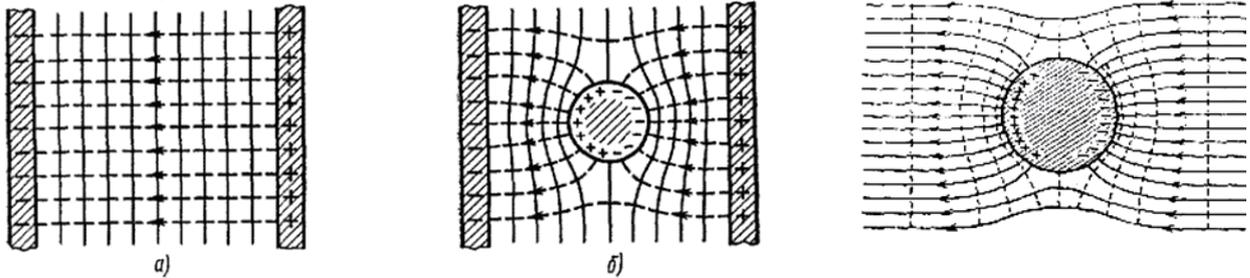
2. при равновесии зарядов на проводнике силовые линии электростатического поля перпендикулярны поверхности проводника (иначе касательная составляющая вектора E приводила бы свободные заряды в движение и равновесия не было бы);



3. заряд на поверхности проводника распределяется неравномерно. Поверхностная плотность заряда зависит от кривизны поверхности: там, где кривизна поверхности меньше, там выше поверхностная плотность заряда, и наоборот (то есть на острие самая большая плотность заряда);



4. благодаря электростатической индукции проводник в электростатическом поле становится подобным диполю, поэтому в пространстве вокруг проводника образуется электрическое поле подобное полю диполя. Это поле деформирует внешнее электрическое поле (см. рис);



5. у самой поверхности проводника напряжённость поля можно найти по формуле: $E = \frac{|\sigma|}{\epsilon\epsilon_0}$,

где σ - поверхностная плотность электрического заряда в данной точке проводника,

ϵ - диэлектрическая проницаемость вещества вокруг проводника, ϵ_0 - электрическая постоянная.

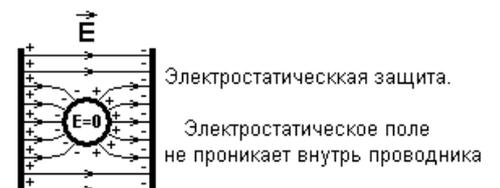
Если проводник до помещения его в электростатическое поле уже был заряжен, то:

- в отрицательно заряженном проводнике избыточные электроны из-за взаимного отталкивания расходятся на максимальное расстояние друг от друга, распределяясь по поверхности проводника (внутри проводника объёмная плотность заряда равна нулю).

- в положительно заряженном проводнике свободные электроны втягиваются внутрь избыточным положительным зарядом протонов. Из-за ухода электронов с поверхности на ней остается избыточный положительный заряд.

Таким образом, при равновесии заряда на проводнике, находящемся во внешнем электростатическом поле, внутри проводника электрического поля нет, то есть внешнее электростатическое поле *внутри проводника не проникает*.

Это используется при экранировании от электростатических полей и называется *электростатической защитой*.

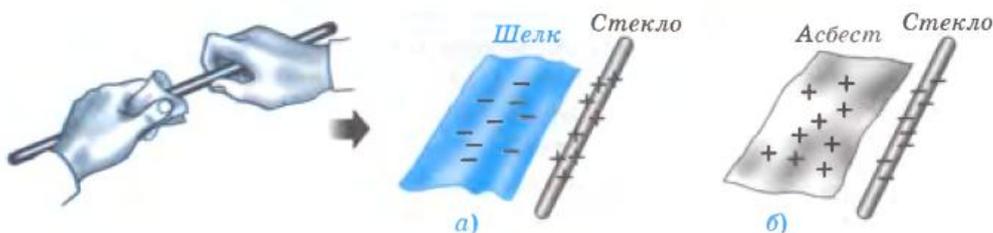


Диэлектрики в электростатическом поле

Диэлектриками называются вещества, которые при обычных условиях не проводят электрический ток. (это объясняется отсутствием в веществе свободных носителей тока)

Пример диэлектриков: стекло, пластмассы, резина и т.д.

При трении двух незаряженных диэлектриков друг о друга их можно наэлектризовать (то есть сообщить каждому электрический заряд). Это происходит из-за того, что при трении электроны одного диэлектрика могут перейти на другой в результате чего, первый диэлектрик всегда заряжается положительно (так как у него оказывается недостаток электронов), а другой отрицательно (так как у него оказывается избыток электронов). В зависимости от материала соприкасающихся тел, один и тот же диэлектрик может приобретать разные по знаку заряды (см. рис)



Различают три основных вида диэлектриков: неполярные, полярные, ионные.

1. **Неполярными** называются диэлектрики, дипольный момент которых в отсутствии внешнего магнитного поля равен нулю.

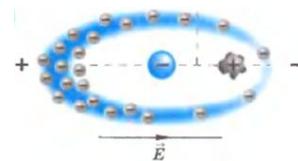
К ним относятся диэлектрики, молекулы которых имеют симметричное строение ($H_2; O_2; CO_2$ и др.), в результате чего центр тяжести связанных положительных и отрицательных зарядов молекулы совпадают, поэтому их дипольный момент в отсутствии внешнего электрического поля оказывается равным нулю. Такие молекулы не создают вокруг себя электрическое поле.



Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков не зависит от температуры диэлектрика (при постоянстве концентрации молекул).

2. **Полярными** называются диэлектрики, дипольный момент которых в отсутствии внешнего магнитного поля не равен нулю.

К ним относятся диэлектрики, молекулы которых имеют несимметричное строение (H_2O, NH_3, CO и др.), в результате чего центр тяжести связанных положительных и отрицательных зарядов молекулы не совпадают, поэтому их дипольный момент оказывается отличным от нуля. Такие молекулы даже в отсутствии внешнего электрического поля создают вокруг себя электрическое поле, то есть ведут себя подобно диполям.



Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков уменьшается с увеличением температуры диэлектрика.

3. **Ионными** называются кристаллические диэлектрики, которые представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов противоположных знаков.

В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы. Их можно рассматривать как систему вставленных одна в другую ионные подрешетки.

(пример ионных диэлектриков: $NaCl, KCl, KBr$ и др.)

Поляризация диэлектриков

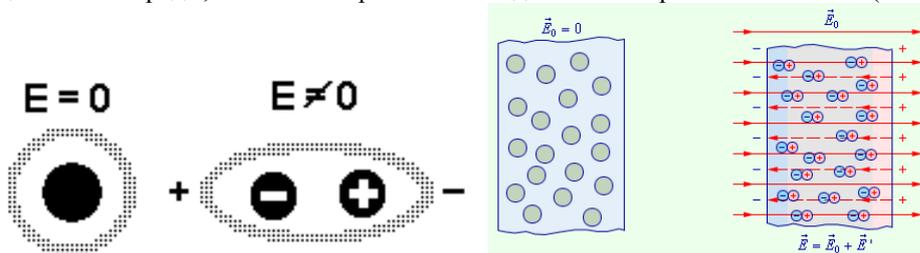
При внесении всех видов диэлектриков во внешнее электростатическое поле происходит их *поляризация*.

Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей полярных диэлектриков или появление под действием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей неполярных диэлектриков.

Различают следующие виды поляризации:

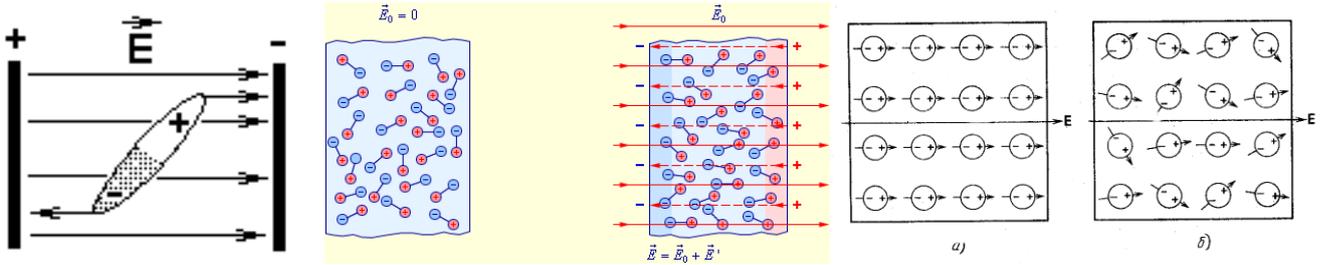
1. **электронная (или деформационная)** поляризация диэлектрика с неполярными молекулами.

При внесении неполярного диэлектрика во внешнее электростатическое поле, происходит деформация электронных оболочек атомов вдоль внешнего поля, в результате чего они приобретают отличный от нуля дипольный момент. В неполярных диэлектриках электростатическое поле сначала поляризует молекулы, растягивая в разные стороны положительные и отрицательные заряды, а затем поворачивает их вдоль оси напряженности поля. (см. рис.)



2. ориентационная (или дипольная) поляризация диэлектрика с полярными молекулами.

При внесении полярного диэлектрика во внешнее электростатическое поле, происходит ориентация дипольных моментов молекул вдоль внешнего поля, однако тепловое движение молекул пытается препятствовать этой ориентации (см. рис.).



Эта ориентация тем сильнее, чем больше напряжённость электрического поля и меньше температура диэлектрика.

3. ионная поляризация диэлектрика с ионными кристаллическими решётками.

Заключается в смещении подрешёток положительных ионов вдоль поля, а подрешёток отрицательных ионов против поля, приводящем к возникновению дипольных моментов.

Вектор поляризации диэлектрика

Независимо от вида поляризации у любого поляризованного диэлектрика появляется в электрическом поле отличный от нуля суммарный электрический дипольный момент.

Тепловое движение молекул препятствует упорядоченной ориентации всех диполей. Только при температуре абсолютного нуля все диполи выстроились бы вдоль силовых линий поля. Таким образом, под влиянием поля происходит лишь частичная ориентация электрических диполей. Это означает, что в среднем число диполей, ориентированных вдоль поля, больше, чем число диполей, ориентированных против поля.

При внесении диэлектрика во внешнее магнитное поле он поляризуется, то есть приобретает отличный от нуля дипольный момент

$$\vec{p}_V = \sum \vec{p}_i, \text{ где } \vec{p}_i \text{ - дипольный момент } i\text{-ой молекулы.}$$

Явление поляризации описывается с помощью важной характеристики *поляризованности* или *вектора поляризации*.

Поляризованностью диэлектрика называется физическая величина численно равная суммарному электрическому (дипольному) моменту молекул заключенных в единице объема:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}, [P] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Наблюдения показывают, что для большинства диэлектриков (кроме сегнетоэлектриков) поляризованность P линейно зависит от напряжённости электрического поля, то есть

$$\vec{P} = \varkappa \varepsilon_0 \vec{E},$$

где \varkappa (каппа) - **диэлектрическая восприимчивость вещества**, безразмерная,

E - напряжённость электрического поля внутри диэлектрика.

\varkappa всегда больше единицы.

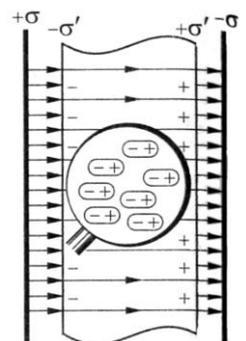
Напряжённость электрического поля внутри диэлектрика

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, в результате чего на его противоположных сторонах возникают не скомпенсированные заряды, которые образовались не в результате перемещения свободных зарядов (так как таковых в диэлектрике нет), а за счёт связанных с атомами диэлектрика валентных электронов.

Эти возникшие на поверхности диэлектрика заряды так и называются **связанными**.

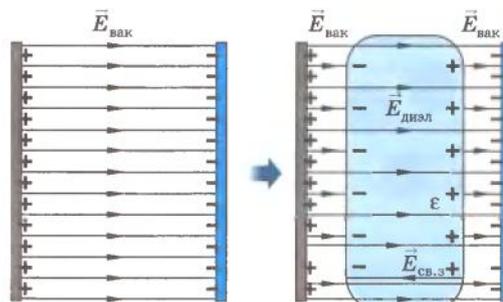
Связанные заряды – разноименные заряды, входящие в состав атомов (или молекул), которые не могут перемещаться под действием электрического поля независимо друг от друга.

Эти заряды создают внутри диэлектрика свое электрическое поле, которое всегда оказывается направленным против внешнего поля, поэтому результирующее поле внутри диэлектрика, согласно принципу суперпозиции, уменьшается.



292

Электростатическое поле в диэлектрике.
Поле связанных зарядов, направленное противоположно напряжённости внешнего электростатического поля, уменьшает напряжённость в ε раз



В диэлектрике напряженность суммарного поля связанных зарядов направлена противоположно напряженности внешнего поля. Вследствие этого поле в диэлектрике ослабляется. Степень ослабления зависит от свойств диэлектрика. Ослабление поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом характеризует *относительная диэлектрическая проницаемость вещества*.

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества – это число, показывающее во сколько раз модуль напряженности электростатического поля в однородном диэлектрике $E_{в\ вещества}$ меньше, чем напряженность поля в вакууме $E_{в\ вакууме}$:

$$\varepsilon = \frac{E_{в\ вакууме}}{E_{в\ веществе}}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает так же, во сколько раз сила взаимодействия между заряженными частицами в данной среде меньше, чем в вакууме: $\varepsilon = \frac{F_{в\ вакууме}}{F_{в\ веществе}}$

Вектор электрического смещения (электрической индукции)

Вектор напряженности электрического поля, переходя через границу диэлектрика, претерпевает скачкообразное изменение, создавая тем самым неудобства при расчётах электрического поля в веществе. Для упрощения этих расчётов был введён вектор **электрического смещения**, величина которого не зависит от свойств диэлектрика и который определяется по одной из следующих формул:

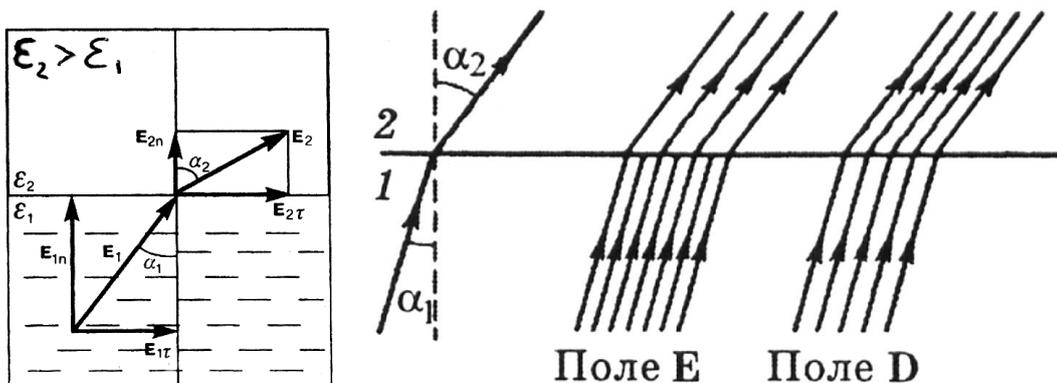
$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \quad \text{или} \quad \vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P} \quad [D] = \frac{Кл}{м^2}.$$

Вектор \vec{D} характеризует электростатическое поле, создаваемое свободными зарядами в вакууме при таком их расположении в пространстве, какое имеется при наличии диэлектрика.

Силовые линии вектора \vec{D} создают только свободные заряды, а силовые линии вектора \vec{E} создают как свободные, так и связанные электрические заряды.

Электростатическое поле на границе двух диэлектриков

Напряженность электрического поля зависит от относительной диэлектрической проницаемости среды ε поэтому при наличии нескольких граничащих диэлектриков на границе разрыва двух сред напряженность поля меняется скачком (линии вектора E терпят разрыв).



Наблюдения показывают, что при переходе электростатического поля через границу раздела двух диэлектриков, происходит преломление силовых линий этого поля (см. рис).

Математические расчёты позволяют определить степень этого преломления:

- при переходе через границу раздела двух диэлектриков тангенциальные составляющие вектора напряженности электростатического поля E_{τ} и нормальные составляющие вектора электрического смещения D_n не претерпевают изменений:

$$E_{2\tau} = E_{1\tau} \quad \text{и} \quad D_{2n} = D_{1n}.$$

- при переходе через границу раздела двух диэлектриков нормальные составляющие вектора напряженности электростатического поля E_n и тангенциальные составляющие вектора электрического смещения D_{τ} не претерпевают изменений:

$$\varepsilon_2 E_{2n} = \varepsilon_1 E_{1n} \quad \text{и} \quad \varepsilon_1 D_{2\tau} = \varepsilon_2 D_{1\tau}$$

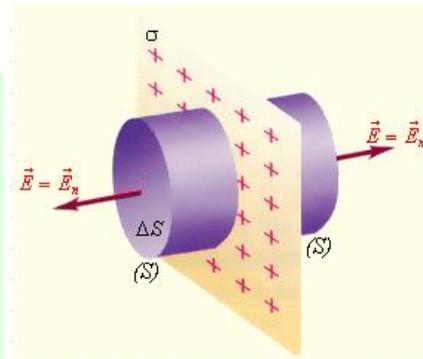
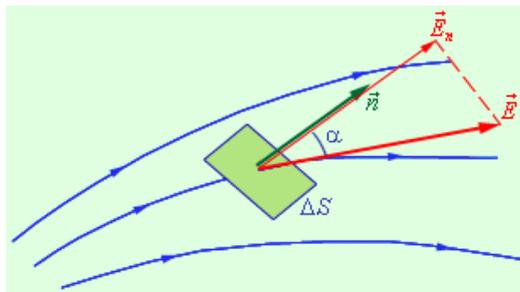
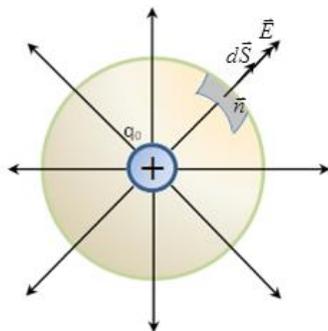
Поток вектора \vec{D}

Элементарным потоком вектора \vec{D} называется скалярная величина, равная скалярному произведению вектора \vec{D} на элементарный вектор площади поверхности $d\vec{s}$, через который определяется поток, то есть:

$$d\Phi_D = \vec{D}d\vec{s} \quad [\Phi] = Кл$$

В общем случае поток вектора \vec{D} через произвольную поверхность определяется по формуле:

$$\Phi = \int_S \vec{D}d\vec{s}$$



Теорема Гаусса для электростатического поля в веществе:

Поток вектора \vec{D} электростатического поля в диэлектрике через произвольную замкнутую поверхность S равен алгебраической сумме свободных зарядов $\sum q_{своб}$, находящихся внутри этой поверхности:

$$\oiint_S \vec{D}d\vec{s} = \sum q_{своб}.$$

Ёмкость уединённого проводника

Уединённым называется проводник, который так далеко удалён от других проводников, что они не оказывают на него ни какого влияния.

Опыт показывает, что потенциал уединённого проводника прямопропорционален его заряду.

Электрической ёмкостью (электроёмкостью) уединенного проводника называется физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу

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

где C – ёмкость проводника, $[C] = \Phi$ - Фарад, q - заряд проводника, $[Кл]$

Чем больше ёмкость проводника, тем больший максимальный заряд может на нем находиться.

При определенном потенциале $\varphi_{max} = \frac{q_{max}}{C}$ заряды начинают покидать проводник. Силы отталкивания выбрасывают заряды с поверхности проводника из-за их слишком большого количества.

Ёмкость уединённой сферы (или шара)

Электроёмкость уединенного проводника определяется его геометрическими размерами.

Электроёмкость уединённой сферы зависит от её радиуса:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R,$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится сфера или шар, ϵ_0 - электрическая постоянная, R - радиус сферы или шара, $м$.

Ёмкость в один фарад 1Φ очень большая величина. Такую ёмкость имеет шар радиусом $R = \frac{C}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 м$, что

больше радиуса Солнца. Поэтому на практике пользуются кратными единицами электрической ёмкости:

$$1 \text{ пФ (pF пикофарад)} = 10^{-12} \Phi,$$

$$1 \text{ мкФ (\mu F микрофарад)} = 10^{-6} \Phi.$$

Конденсаторы

Конденсатором называется устройство для накопления электрического заряда.

Конденсатор представляет собой систему из двух проводников с равными по величине, но противоположными по знаку зарядами. Проводники в этом случае называют *обкладками конденсатора*, которые обычно разделены слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

В конденсаторе накапливается электрический заряд и соответственно энергия электростатического поля.



Обозначение конденсатора на схеме

Ёмкость конденсатора

Способность конденсатора к накоплению заряда характеризует его *электрическая емкость*.

Ёмкостью (или электроёмкостью) конденсатора называется скалярная величина, равная отношению заряда положительной обкладки конденсатора к разности потенциалов между ними:

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

где q - заряд конденсатора (он равен заряду одной его обкладки), [Кл],

$U = \varphi_1 - \varphi_2$ - напряжение на конденсаторе (или разность потенциалов между обкладками конденсатора), [В];

φ_1 - потенциал положительной обкладки конденсатора, В; φ_2 - потенциал отрицательной обкладки конденсатора, [В].

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из его обкладок.

Энергия электрического поля уединённого проводника

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

где $W_{эл} = [Дж]$ - энергия электрического поля уединённого проводника,

$C = [Ф]$ - ёмкость уединённого проводника,

$\varphi = [В]$ - потенциал уединённого проводника,

$q = [Кл]$ - заряд уединённого проводника.

Типы конденсаторов

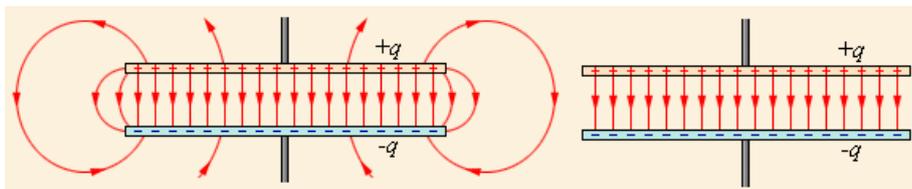
В зависимости от материала, из которого изготавливаются конденсаторы, их разделили на следующие типы:

- Керамические
- Танталовые
- Электролитические – изготовленные из металлической фольги с оксидной пленкой в качестве изолятора. Обладают наибольшей емкостью
- Слюдяные – изготовленные из металлизированной слюды
- Майларовые – изготовленные из покрытой алюминием (алитированной) майларовой пленки



Внешний вид различных типов конденсаторов

Каждому типу конденсаторов присущи свои свойства и области применения. Почти все электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора между его обкладками. Вне пластин поле отсутствует, так как напряженности пластин компенсируют друг друга.



Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому электрическая емкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Наибольшее распространения получили следующие виды конденсаторов:

- плоские,
- цилиндрические,
- сферические.

Плоский конденсатор

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных плоских пластин площадью S каждая, находящихся на малом расстоянии d друг от друга.

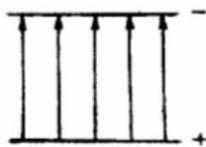
Ёмкости плоского конденсатора зависит от его геометрических размеров: $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$

где S – площадь одной пластины (обкладки) конденсатора, $[м^2]$,

d – расстояние между пластинами конденсатора, $[м]$.

ε – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора, ε_0 – электрическая постоянная

Особенность электрического поля плоского конденсатора:

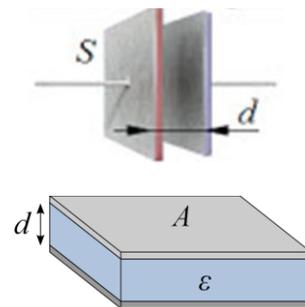


Поле плоского конденсатора

Электрическое поле внутри плоского конденсатора однородно (краевыми эффектами обычно

пренебрегают), и его напряжённость можно рассчитать по формуле: $E = \frac{U}{d}$,

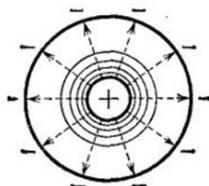
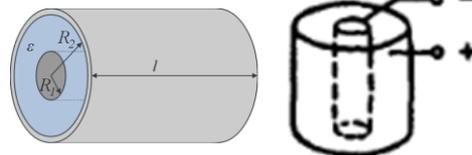
где U - напряжение на конденсаторе, $[В]$.



Цилиндрический конденсатор

Цилиндрический конденсатор представляет собой два коаксиальных цилиндра (то есть с общей осью), разделённых между собой слоем диэлектрика.

Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора $C = 2\pi \frac{\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$,



где l - длина обкладок конденсатора, $м$;

ε – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора;

ε_0 - электрическая постоянная,

r_2 - радиус его внешней обкладки, $м$; r_1 - радиус его внутренней обкладки, $м$.

Электрическое поле внутри цилиндрического конденсатора неоднородное

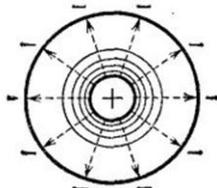
Сферический конденсатор

Сферический конденсатор представляет собой две концентрические сферы (то есть с центром), разделённые между собой слоем диэлектрика.

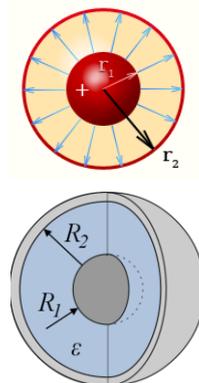
Электрическая ёмкость сферического конденсатора $C = 4\pi \frac{\varepsilon\varepsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1}$

где r_2 - радиус его внешней обкладки, $м$; r_1 - радиус его внутренней обкладки, $м$.

ε – диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора; ε_0 - электрическая постоянная.



Электрическое поле внутри сферического конденсатора неоднородное



Энергия электрического поля конденсатора

При зарядке конденсатора внутри него возникает электрическое поле, энергию которого можно рассчитать по формулам:

$$W_{эл} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

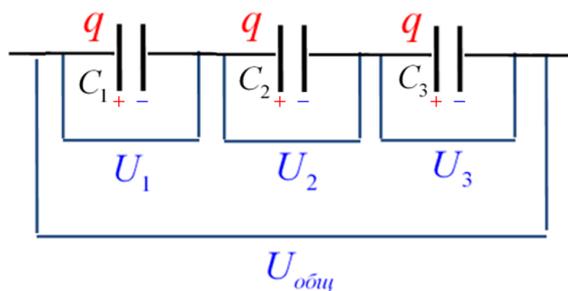
где $W_{эл} = [Дж]$ - энергия электрического поля конденсатора, $C = [Ф]$ - ёмкость конденсатора,

$q = [Кл]$ - заряд конденсатора,

$U = [В]$ - напряжение на конденсаторе.

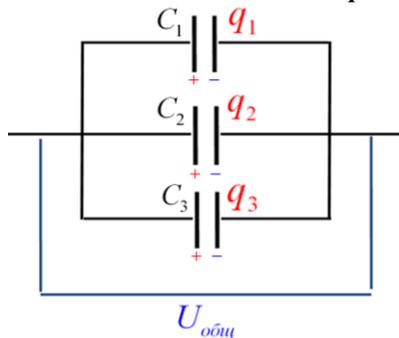
Виды соединения конденсаторов

Последовательное соединение конденсаторов



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{C_{общ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \\ U_{общ} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ q_{общ} = q_1 = q_2 = \dots = q_n \\ C_i = \frac{q_i}{U_i} \quad C_{общ} = \frac{q_{общ}}{U_{общ}} \end{array} \right.$$

Параллельное соединение конденсаторов



$$\left\{ \begin{array}{l} C_{общ} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \\ U_{общ} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \\ q_{общ} = q_1 + q_2 + \dots + q_n \\ C_i = \frac{q_i}{U_i} \quad C_{общ} = \frac{q_{общ}}{U_{общ}} \end{array} \right.$$