

Тема: Проводники и диэлектрики в электростатическом поле. Электроёмкость. Конденсаторы. Электроёмкость плоского конденсатора. Энергия электростатического поля конденсатора.

Теоритические данные

Проводники в электростатическом поле

Проводниками называются вещества в которых возможно направленное движение заряженных частиц.

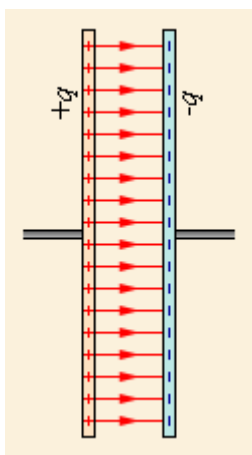
В металлах такими частицами являются свободные электроны – они могут свободно перемещаться от одного конца проводника до другого.

В жидкостях такими частицами являются ионы – водные растворы солей, кислот, щелочей.

В газах – как электроны так и ионы.

Сегодня мы с вами для простоты будем считать что имеем дело с металлами, но все что мы с вами рассмотрим будет относиться и остальным проводникам тоже.

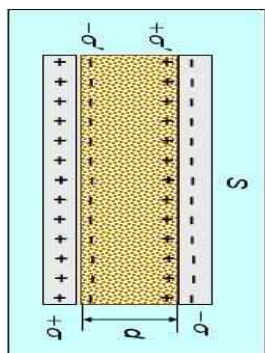
Электрическое поле мы создадим с помощью двух параллельных заряженных пластин.



Одна пластинка заряжена положительно, вторая отрицательно, одинаковы по модулю, но противоположны по знаку. Между этими пластинками образуется электростатическое поле, направленное от + к -.

\vec{E}_0 – напряженность поля, создаваемого конденсатором.

Поместим в это поле металлическую пластину - проводник



В проводнике есть свободные носители заряда, когда мы помещаем проводник во внешнее поле, то эти носители заряда оказавшись в этом внешнем поле

начинают двигаться – отрицательно заряженные электроны начинают двигаться против поля, положительно заряженные ионы – в направлении поля. Слева появляются отрицательные заряды, справа положительные заряды, эти заряды появились благодаря наличию внешнего поля, такие заряды называются индуцированные заряды.

индуцированные заряды – это заряды, появившиеся в проводнике под воздействием внешнего электрического поля.

По мере того, как индуцированные заряды накапливаются на поверхности проводника увеличивается поле, создаваемое индуцированными зарядами. Это поле направлено в направлении, противоположном направлению внешнего поля.

\vec{E}_i – напряженность поля, индуцированных зарядов.

Тогда напряжённость поля будет складываться из напряжённостей двух полей, поля внешнего и внутреннего (индуцированного).

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

По мере того как накапливаются индуцированные заряды внутри проводника поле индуцированных зарядов увеличивается, а значит поле внутри проводника становится все меньше и меньше, пока не уменьшится до нуля.

Это происходит за время около 10^{-13} с, т.е. практически мгновенно.

Вывод: электростатическое поле в проводнике существовать не может!

А если проводник заряжен, будет ли в нем существовать электростатическое поле? Нет, в его объёме поля нет.

Вывод: заряды в заряженном проводнике располагаются на поверхности проводника.

На сферически равномерных проводниках заряд распределен равномерно, на заострённых проводниках заряд скапливается на острие.

«Ионный ветер» – физическое явление, при котором движение воздуха создаётся с помощью электрического поля.

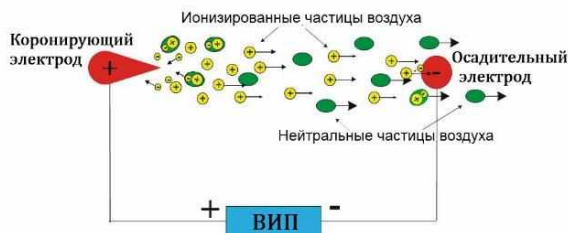
Повышение напряжения электрического поля вблизи положительного электрода приводит к ионизации окружающего воздуха, после чего образовавшиеся ионы начинают перемещаться к отрицательно заряженному собирающему электроду, увлекая за собой нейтральные частицы воздуха.

А передвижение воздуха и есть ветер, который можно почувствовать кожей или обнаружить по действию на пламя свечи (оно отклоняется).

Подробнее:

Устройство для создания ионного ветра довольно простое. Оно содержит «острый» и «тупой» электроды с присоединённым к ним источником высоковольтного питания (ВИП).

Острым электродом может быть игла, лезвие, тонкая проволока (в нашем случае это были острые края обломанного карандашного грифеля; кромка медной пластины).



Ускорение молекул газа происходит следующим образом.

В непосредственной близости от «острого» (коронирующего) электрода возникает коронный разряд и электрически заряжаются молекулы воздуха, превращаясь при этом в ионы. Мы наблюдаем это в виде плазмы голубого свечения.

На втором этапе образовавшиеся ионы ускоряются под действием сильного электрического поля по направлению к противоположному электроду, называемому осадительным электродом. В процессе движения ионы сталкиваются с нейтральными молекулами и придают им движение в том же направлении.

На третьем этапе ионы и другие заряженные частицы достигают поверхности осадительного электрода и отдают ему полученный ранее электрический заряд.

Диэлектрики в электростатическом поле. Диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрики – это вещества в которых отсутствуют свободные носители заряда.

Но ведь каждая молекула состоит из атомов, а он в свою очередь – из заряженных частиц которые обладают зарядом.

Существует 2 вида диэлектриков:

1. Неполярные диэлектрики

Инертные газы (водород, гелий, аргон...)

Рассмотрим атомарный водород, поскольку электрон совершает огромное количество оборотов с секунду вокруг ядра (примерно 10^{15} оборотов), то можно считать что он находится в центре, т.е где-то рядом с ядром.

Вещество, внесенное в электрическое поле, может существенно изменить его. Это связано с тем, что вещество состоит из заряженных частиц. В отсутствие внешнего поля частицы распределяются внутри вещества так, что создаваемое ими электрическое поле в среднем по объемам, включающим большое число атомов или молекул, равно нулю. При наличии внешнего поля происходит перераспределение заряженных частиц, и в веществе возникает собственное электрическое поле. Полное электрическое поле \vec{E} складывается в соответствии с принципом суперпозиции из внешнего поля \vec{E}_n и внутреннего поля \vec{E}' , создаваемого заряженными частицами вещества.

Вещество многообразно по своим электрическим свойствам. Наиболее широкие классы вещества составляют **проводники** и **диэлектрики**.

Основная особенность проводников – наличие свободных зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объему проводника. Типичные проводники – металлы.

В отсутствие внешнего поля в любом элементе объема проводника отрицательный свободный заряд компенсируется положительным зарядом ионной решетки. В проводнике, внесенном в электрическое поле, происходит перераспределение свободных зарядов, в результате чего на поверхности проводника возникают нескомпенсированные положительные и отрицательные заряды (рис.1). Этот процесс называют электростатической индукцией, а появившиеся на поверхности проводника заряды – индукционными зарядами.

Индукционные заряды создают свое собственное поле \vec{E}' , которое компенсирует внешнее поле \vec{E}_0 во всем объеме проводника: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$ (внутри проводника).

Полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциалу на поверхности проводника.

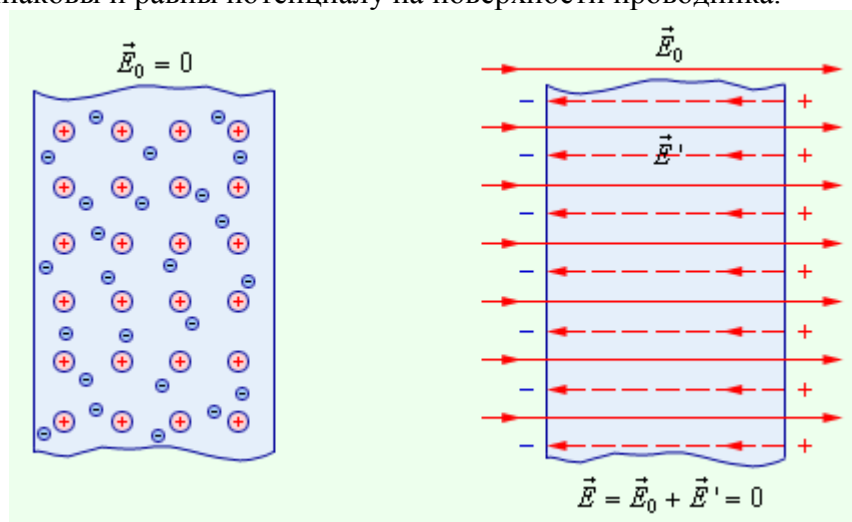


Рисунок 1. Электростатическая индукция

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 (рис. 2).

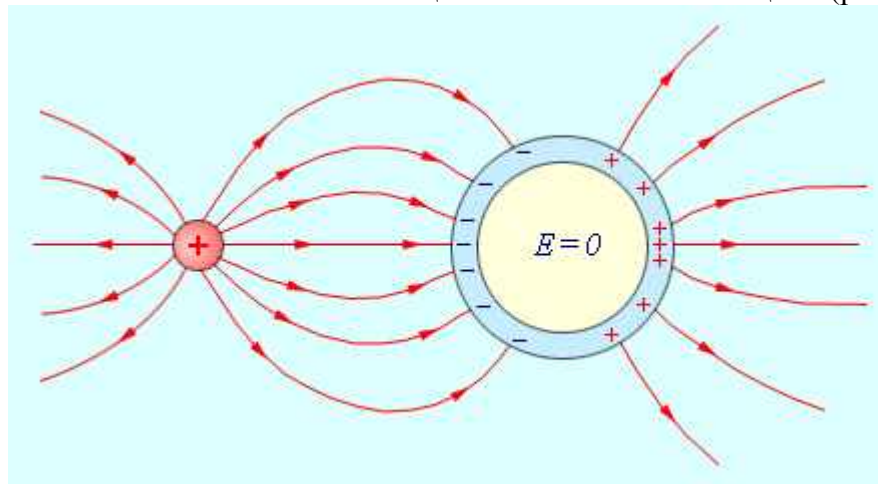


Рис.2. Электростатическая защита. Поле в металлической полости равно нулю

Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, силовые линии у поверхности должны быть перпендикулярны к ней.

В отличие от проводников, в диэлектриках (изоляторах) нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле \vec{E}_0 в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные нескомпенсированные связанные заряды. Все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле \vec{E}' , которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности \vec{E}_0 внешнего поля. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. В результате полное электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности внешнего электрического поля в вакууме к модулю напряженности \vec{E}_0 полного поля в однородном диэлектрике, называется диэлектрической проницаемостью вещества.

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются ориентационная и электронная поляризации. Эти механизмы проявляются главным образом при поляризации газообразных и жидких диэлектриков.

Ориентационная или дипольная поляризация возникает в случае полярных диэлектриков, состоящих из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы представляют собой микроскопические электрические диполи – нейтральную совокупность двух зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Дипольным моментом обладает, например, молекула воды, а также молекулы ряда других диэлектриков (H₂S, NO₂ и т. д.).

При отсутствии внешнего электрического поля оси молекулярных диполей из-за теплового движения ориентированы хаотично, так что на поверхности диэлектрика и в любом элементе объема электрический заряд в среднем равен нулю.

При внесении диэлектрика во внешнее поле возникает частичная ориентация молекулярных диполей. В результате на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные макроскопические связанные заряды, создающие поле направленное навстречу внешнему полю (рис. 3).

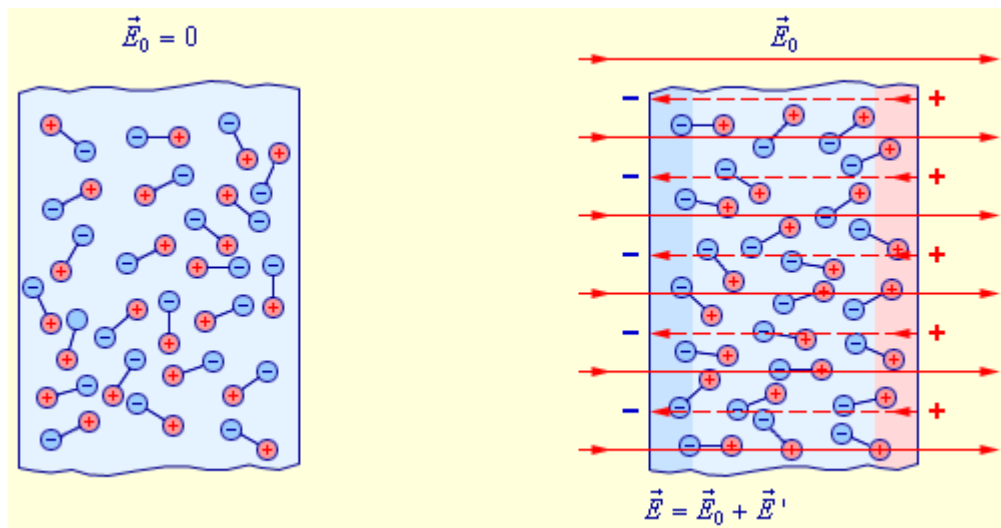


Рисунок 3. Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

Поляризация полярных диэлектриков сильно зависит от температуры, так как тепловое движение молекул играет роль дезориентирующего фактора.

Электронный или упругий механизм проявляется при поляризации неполярных диэлектриков, молекулы которых не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом. Под действием электрического поля молекулы неполярных диэлектриков деформируются – положительные заряды смещаются в направлении вектора а отрицательные – в противоположном направлении. В результате каждая молекула превращается в электрический диполь, ось которого направлена вдоль внешнего поля. На поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле направленное навстречу внешнему полю. Так происходит поляризация неполярного диэлектрика (рис. 4).

Деформация неполярных молекул под действием внешнего электрического поля не зависит от их теплового движения, поэтому поляризация неполярного диэлектрика не зависит от температуры. Примером неполярной молекулы может служить молекула метана CH_4 . У этой молекулы четырехкратно ионизированный ион углерода C^{4+} располагается в центре правильной пирамиды, в вершинах которой находятся ионы водорода H^+ . При наложении внешнего электрического поля ион углерода смещается из центра пирамиды, и у молекулы возникает дипольный момент, пропорциональный внешнему полю.

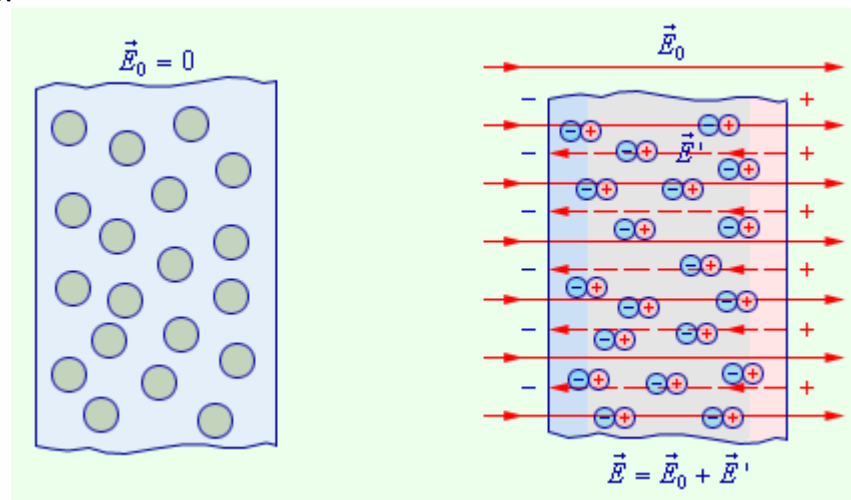


Рисунок 4. Поляризация неполярного диэлектрика

Электрическое поле связанных зарядов, возникающее при поляризации полярных и неполярных диэлектриков, изменяется по модулю прямо пропорционально модулю внешнего поля. В очень сильных электрических полях эта закономерность может

нарушаться, и тогда проявляются различные **нелинейные эффекты**. В случае полярных диэлектриков в сильных полях может наблюдаться эффект насыщения, когда все молекулярные диполи выстраиваются вдоль силовых линий. В случае неполярных диэлектриков сильное внешнее поле, сравнимое по модулю с внутриатомным полем, может существенно деформировать атомы или молекулы вещества и изменить их электрические свойства. Однако, эти явления практически никогда не наблюдаются, так как для этого нужны поля с напряженностью порядка 10^{10} – 10^{12} В/м. Между тем, гораздо раньше наступает электрический пробой диэлектрика.

У многих неполярных молекул при поляризации деформируются электронные оболочки, поэтому этот механизм получил название **электронной поляризации**. Этот механизм является универсальным, поскольку деформация электронных оболочек под действием внешнего поля происходит в атомах, молекулах и ионах любого диэлектрика.

В случае твердых кристаллических диэлектриков наблюдается так называемая **ионная поляризация**, при которой ионы разных знаков, составляющие кристаллическую решетку, при наложении внешнего поля смещаются в противоположных направлениях, вследствие чего на гранях кристалла появляются связанные (нескомпенсированные) заряды. Примером такого механизма может служить поляризация кристалла NaCl, в котором ионы Na^+ и Cl^- составляют две подрешетки, вложенные друг в друга. В отсутствие внешнего поля каждая элементарная ячейка кристалла NaCl электронейтральна и не обладает дипольным моментом. Во внешнем электрическом поле обе подрешетки смещаются в противоположных направлениях, т. е. кристалл поляризуется.

При поляризации неоднородного диэлектрика связанные заряды могут возникать не только на поверхностях, но и в объеме диэлектрика. В этом случае электрическое поле связанных зарядов и полное поле могут иметь сложную структуру, зависящую от геометрии диэлектрика. Утверждение о том, что электрическое поле в диэлектрике в ϵ раз меньше по модулю по сравнению с внешним полем строго справедливо только в случае однородного диэлектрика, заполняющего все пространство, в котором создано внешнее поле. В частности:

Если в однородном диэлектрике с диэлектрической проницаемостью ϵ находится точечный заряд Q , то напряженность поля создаваемого этим зарядом в некоторой точке, и потенциал φ в ϵ раз меньше, чем в вакууме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\epsilon r^3} \vec{r}, \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon r}.$$