

ЛЕКЦИЯ 8 декабря

Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы.

По электрическим свойствам все вещества разделяют на два больших класса - вещества, которые проводят электрический ток (**проводники**) и вещества, которые не проводят электрический ток (**диэлектрики**, или изоляторы).

Мы знаем, что все вещества состоят из атомов, которые, в свою очередь, состоят из заряженных частиц. Если внешнее поле вокруг вещества отсутствует, то его частицы распределяются так, что суммарное электрическое поле внутри вещества равно нулю. Если вещество поместить во внешнее электрическое поле, то поле начнет действовать на заряженные частицы и они перераспределяться так, что в веществе возникнет собственное электрическое поле. Полное электрическое поле $\vec{E}$ складывается из внешнего поля $\vec{E}_0$ и внутреннего поля $\vec{E}'$ создаваемого заряженными частицами вещества.

Проводник - это тело или материал, в котором электрические заряды начинают перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому эти заряды называют **свободными**.

В металлах свободными зарядами являются электроны, в растворах и расплавах солей (кислот и щелочей) - ионы.

Диэлектрик - это тело или материал, в котором под действием сколь угодно больших сил заряды смещаются лишь на малое, не превышающее размеров атома расстояние относительно своего положения равновесия. Такие заряды называются **связанными**.

Рассмотрим подробнее эти классы веществ.

Проводники в электрическом поле.

Проводниками называют вещества, проводящие электрический ток.

Типичными проводниками являются металлы.

Основная особенность проводников – наличие **свободных зарядов** (в металлах это электроны), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объему проводника.

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. Этот процесс называют **электростатической индукцией**, а появившиеся на поверхности проводника заряды – **индукционными зарядами**.

*Явление перераспределения зарядов внутри проводника под действием внешнего электрического поля называется **электростатической индукцией**.*

Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, называются **индукционными зарядами**.

Индукционные заряды создают свое собственное поле $\vec{E}'$, которое компенсирует внешнее поле $\vec{E}_0$ во всем объеме проводника:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0 \text{ (внутри проводника).}$$

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

Диэлектрики в электрическом поле.

Диэлектриками (изоляторами) называют вещества, не проводящие электрического тока.

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 внешнего поля $\vec{E}_0$. Этот процесс называется **поляризацией диэлектрика**.

Электрической поляризацией называют особое состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объёма этого вещества не равен нулю.

В результате полное электрическое поле внутри диэлектрика $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ оказывается по модулю меньше внешнего поля $\vec{E}_0$.

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

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

Диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше, чем в диэлектрике. Это величина безразмерная (нет единиц измерения).

При поляризации **неоднородного диэлектрика** связанные заряды могут возникать не только на поверхностях, но и в объеме диэлектрика. В этом случае

электрическое поле связанных зарядов $\vec{E}'$ и полное поле $\vec{E}$ могут иметь сложную структуру, зависящую от геометрии диэлектрика. Утверждение о том, что электрическое поле $\vec{E}$ в диэлектрике в ϵ раз меньше по модулю по сравнению с внешним полем $\vec{E}_0$ 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 $\vec{E}$, создаваемого этим зарядом в некоторой точке, и потенциал φ в ϵ раз меньше, чем в вакууме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r}$$

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются **ориентационная**, **электронная** и **ионная** поляризации. Ориентационная и электронная механизмы проявляются главным образом при поляризации газообразных и жидких диэлектриков, ионная - при поляризации твердых диэлектриков.

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\varphi$, зависящая от величин зарядов и геометрии проводников.

Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между двумя точками в электрическом поле часто называют **напряжением** и обозначают буквой **U** .

Наибольший практический интерес представляет случай, когда заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $q_1 = -q_2 = q$. В этом случае можно ввести понятие **электрической емкости**.

Емкостью (электрической емкостью) проводников называется физическая величина, характеризующая способность проводника или системы проводников накапливать электрический заряд.

Емкость находится как отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов $\Delta\varphi$ между ними:

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

$$1\Phi = \frac{1K}{1B}$$

В системе СИ единица емкости называется **фарад [Ф]**:

Величина емкости зависит от формы и размеров проводников и от **свойств диэлектрика**, разделяющего проводники.

Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются **конденсаторами**, а проводники, составляющие конденсатор, называются **обкладками**.

Простейший конденсатор – плоский конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика.

Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами; однако, вблизи краев пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют **полем рассеяния**.

В целом ряде задач можно приближенно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле плоского конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками.

Емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

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

Если пространство между обкладками заполнено **диэлектриком**, емкость конденсатора увеличивается в ϵ раз:

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

Примерами конденсаторов с другой конфигурацией обкладок могут служить сферический и цилиндрический конденсаторы.

Сферический конденсатор – это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов R_1 и R_2 .

Цилиндрический конденсатор – система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов R_1 и R_2 и длины L .

Емкости этих конденсаторов, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ , выражаются формулами:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \text{ - сферический конденсатор}$$

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln R_2 / R_1} \text{ - цилиндрический конденсатор}$$

Для получения заданного значения емкости конденсаторы соединяются между собой, образуя **батареи конденсаторов**.

1) При **параллельном соединении конденсаторов** соединяются их одноименно заряженные обкладки.

Напряжения на конденсаторах одинаковы $U_1 = U_2 = U$, заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$.

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор электроемкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками равном U .

Отсюда следует $C = \frac{q_1 + q_2}{U}$ или $C = C_1 + C_2$

Таким образом, **при параллельном соединении электроемкости складываются.**

2) При **последовательном соединении конденсаторов соединяют разноименно заряженные обкладки**

Заряды обоих конденсаторов одинаковы $q_1 = q_2 = q$, напряжения на них

равны $U_1 = \frac{q}{C_1}$ и $U_2 = \frac{q}{C_2}$

Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$.

Следовательно, $C = \frac{q}{U_1 + U_2}$ или $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей.

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединенных в батарею.

Т.е. в случае n конденсаторов одинаковой емкости C емкость батареи

при параллельном соединении $C_{\text{общ}} = nC$

при последовательном соединении $C_{\text{общ}} = C/n$

Если обкладки заряженного конденсатора замкнуть металлическим проводником, то по цепи пойдет электрический ток, лампочка загорится и будет гореть до тех пор, пока конденсатор не разрядится. Значит, заряженный конденсатор содержит запас энергии.

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор.

Процесс зарядки конденсатора можно представить как последовательный перенос достаточно малых порций заряда $\Delta q > 0$ с одной обкладки на другую. При этом одна обкладка постепенно заряжается положительным зарядом, а другая – отрицательным. Поскольку каждая порция переносится в условиях, когда на обкладках уже имеется некоторый заряд q , а между ними существует некоторая разность потенциалов

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

при переносе каждой порции Δq внешние силы должны совершить работу

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

Энергия W_e конденсатора емкости C , заряженного зарядом q , может быть найдена путем интегрирования этого выражения в пределах от 0 до q :

$$W_e = A = \frac{q^2}{2C}$$

Формулу, выражающую энергию заряженного конденсатора, можно переписать в другой эквивалентной форме, если воспользоваться соотношением $q = CU$.

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

Электрическую энергию W_e следует рассматривать как потенциальную энергию, запасенную в заряженном конденсаторе.

По современным представлениям, электрическая энергия конденсатора локализована в пространстве между обкладками конденсатора, то есть в электрическом поле. Поэтому ее называют **энергией электрического поля**.

<https://www.youtube.com/watch?v=N9W4KptXx1Q>