3. Проводники и электростатическое поле

Проводниками называются тела, имеющие практически неограниченный свободный заряд. Типичными проводниками являются металлы ,концентрация свободных носителей – электронов – в них ~ 10^{22} см$^{-3}$

3.1 Условия равновесия зарядов на проводнике. Поле у поверхности проводника

А) При внесении незаряженного проводника в электрическое поле E_0 на его поверхности возникают **индуцированные заряды.**

Перераспределение зарядов в проводнике под действием внешнего поля называется **явлением электростатической индукции.**

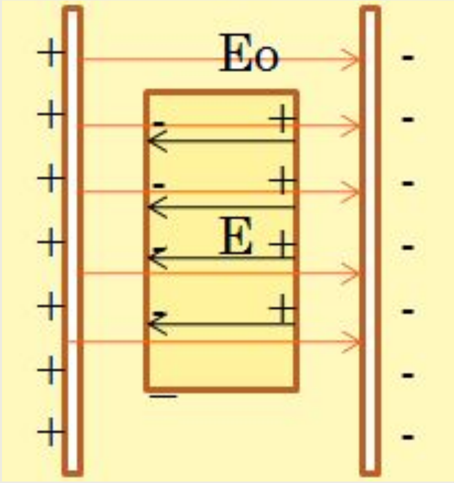
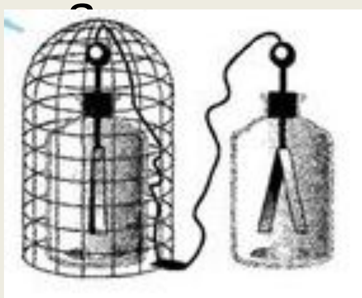


Рис.3.1

Перераспределение зарядов в проводнике происходит до тех пор, пока напряженность поля в нем не станет равна нулю:

$$E_0 - E = 0.$$



На этом явлении основана *электростатическая защита* – защита от внешних электрических полей.

Свободный заряд в проводниках достаточно велик, чтобы скомпенсировать внешнее поле любой реально достижимой величины.

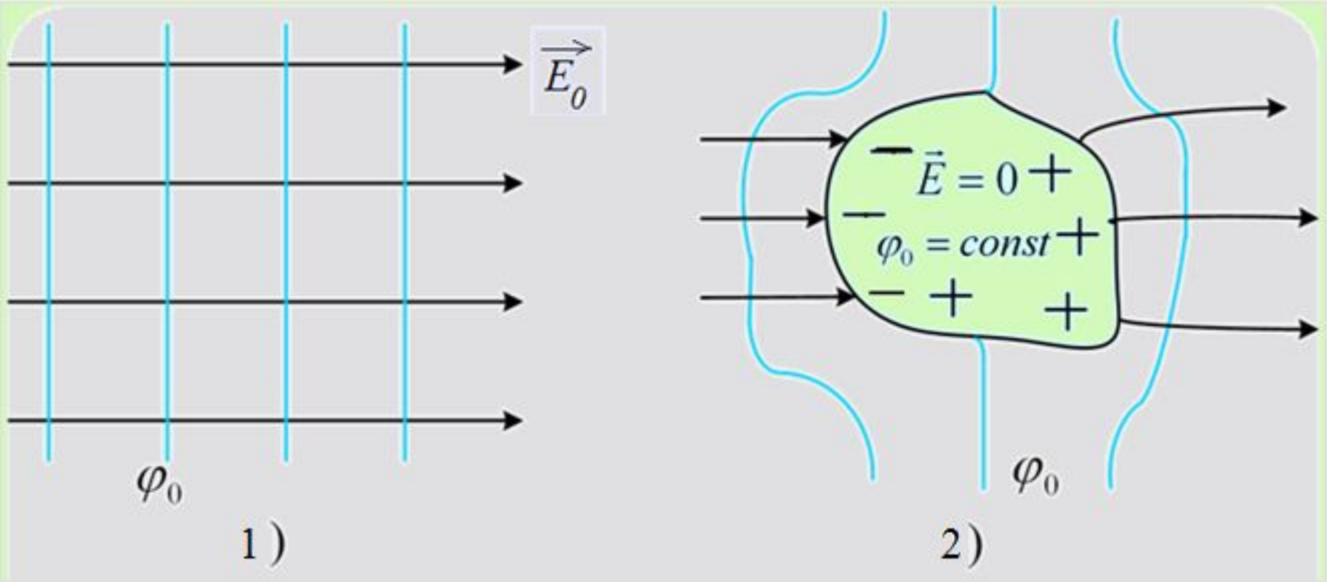


рис.3.1 б

При этом весь объем проводника будет эквипотенциальным

Б) Если сообщить проводнику , находящемуся вне поля, избыточный заряд, он распределится только по поверхности проводника так, что напряженность поля в проводнике будет равна нулю. (рис.3.2).

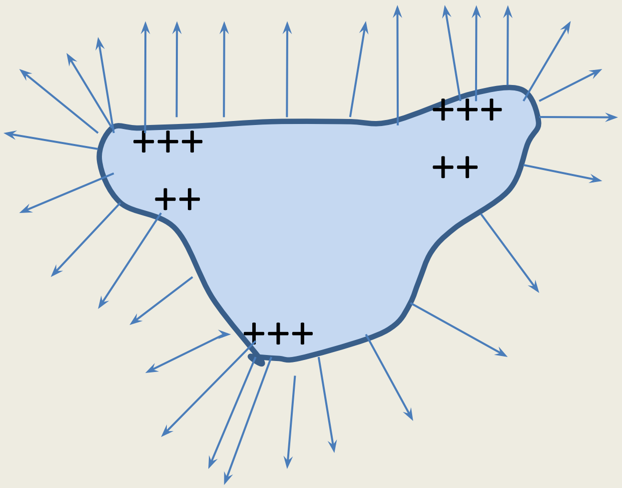


рис.3.2

Для равновесия зарядов на проводнике как в случае нахождения незаряженного проводника в поле, так и в случае заряженного проводника, создающего само поле,необходимы следующие условия:

1) **напряженность электрического поля E внутри проводника =0, потенциал внутри проводника φ_o = const,**

2) **напряженность на поверхности проводника направлена по нормали к поверхности E = En** (в противном случае по поверхности проводника протекал бы электрический ток).

Отсюда следует, что **поверхность проводника в случае равновесия зарядов является эквипотенциальной**.

3.2 Электроемкость. Емкость уединенного проводника.

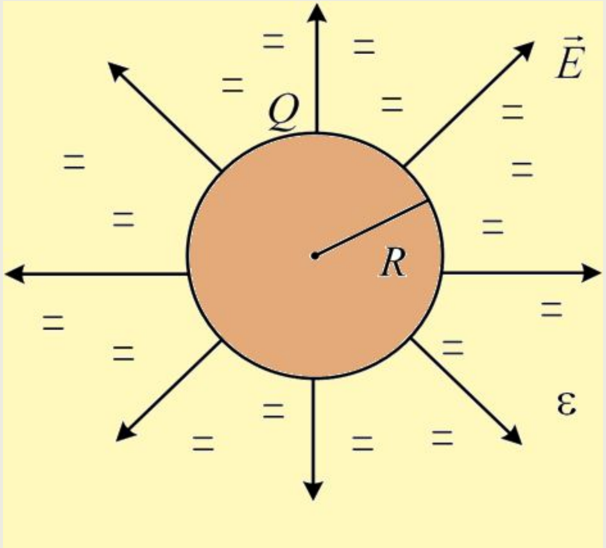
Рассмотрим поле заряженного проводника.
Поверхность и объем его эквипотенциальны, поэтому будем говорить о потенциале проводника в целом.
При сообщении дополнительного заряда q потенциал проводника увеличится, причем изменение потенциала φ пропорционально дополнительному заряду $q = C \cdot \varphi$, при этом коэффициент пропорциональности

$$\boxed{C = \frac{q}{\varphi}} \qquad (3.2)$$

называется **емкостью и характеризует способность данного проводника накапливать заряд.** В самом деле: **емкость численно равна q , который нужно отдать проводнику, чтобы изменить его потенциал на 1 В.**

Емкость зависит только от размеров и формы проводника и диэлектрических свойств среды.

Пример. Найдем электроемкость уединенного заряженного проводящего шара (рис.3.4).



Заряды распределятся по его поверхности равномерно и потенциал во всех точках его поверхности будет одинаков и равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}\ ;\ \varphi = \frac{q}{C}$$

Отсюда следует: электроемкость шара зависит только от его радиуса ε и окружающей среды.

рис.3.4

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \quad (3.3)$$

3.3 Взаимная емкость Конденсаторы.

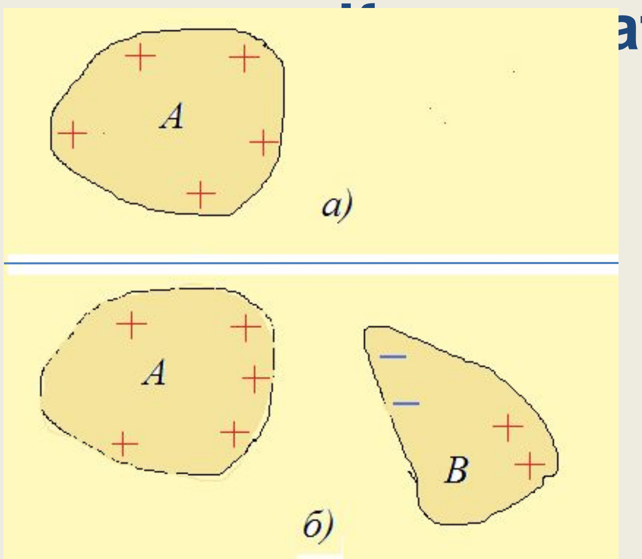


рис. 3.5

Пусть уединенный заряженный проводник А (рис. 3.5а) имеет емкость С. Если вблизи него поместить незаряженный проводник В (рис. 3.5б), то емкость проводника А возрастает. Происходит это потому, что на проводнике В возникают индуцированные заряды.

При этом ближайшим к А окажется (-) индуцированный заряд , т.е. в целом индуцированный заряд ослабляет поле , созданное проводником А и следовательно уменьшает его потенциал. Т.к. на А

$q = C\varphi = const$ то С ↑.

Емкость уединенного проводника возрастает при приближении к нему другого проводника за счет возникновения ***взаимной емкости проводников.***

В случае двух близко расположенных проводников , несущих заряды + q и –q, разность потенциал $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$ иков

, где $C = \frac{q}{\Delta\varphi}$ -- взаимная емкость двух проводников.

Взаимная емкость двух проводников численно равна заряду, который нужно перенести с одного проводника на другой для изменения их разности потенциалов на 1В.

Практические устройства, позволяющие при малых размерах и $\Delta\varphi$
небольших накапливать значительный заряд называются конденсаторами.

Любой конденсатор состоит из 2-х проводников, называемых обкладками конденсатора, между которыми сосредоточено электрическое поле. Заряды обкладок всегда должны быть равны по величине и противоположны по знаку.

Чтобы на поле конденсатора не влияли окружающие тела, расстояние между пластинами конденсатора выполняется значительно меньше их размеров

$$d << \sqrt{s}$$

Электроемкость конденсатора – это взаимная емкость его обкладок

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

. Конденсаторы бывают плоские, цилиндрические и сферические. Емкость плоского конденсатора (рис.3.6) :
Все поле сосредоточено между плоскостями, оно является однородным

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

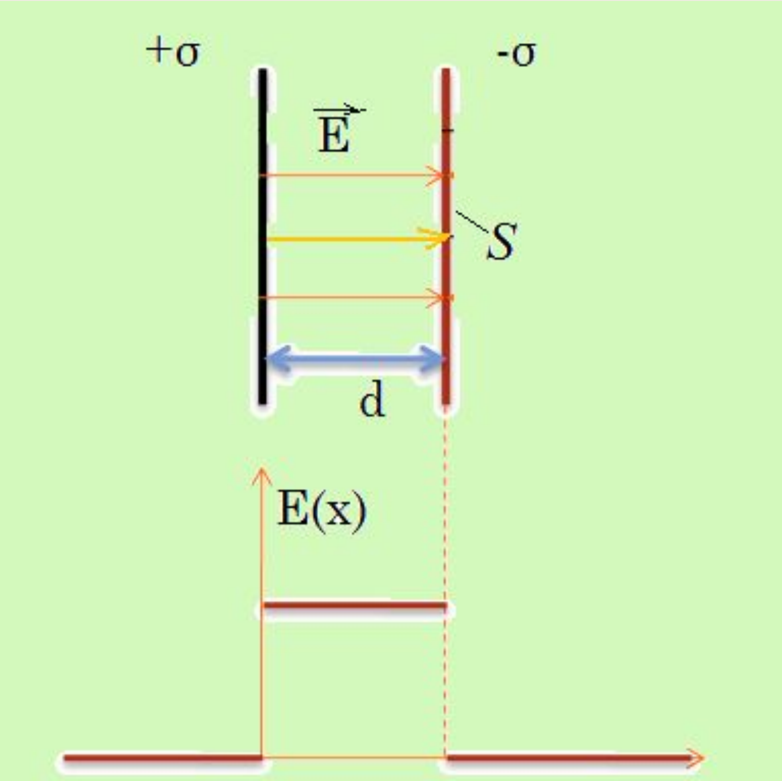
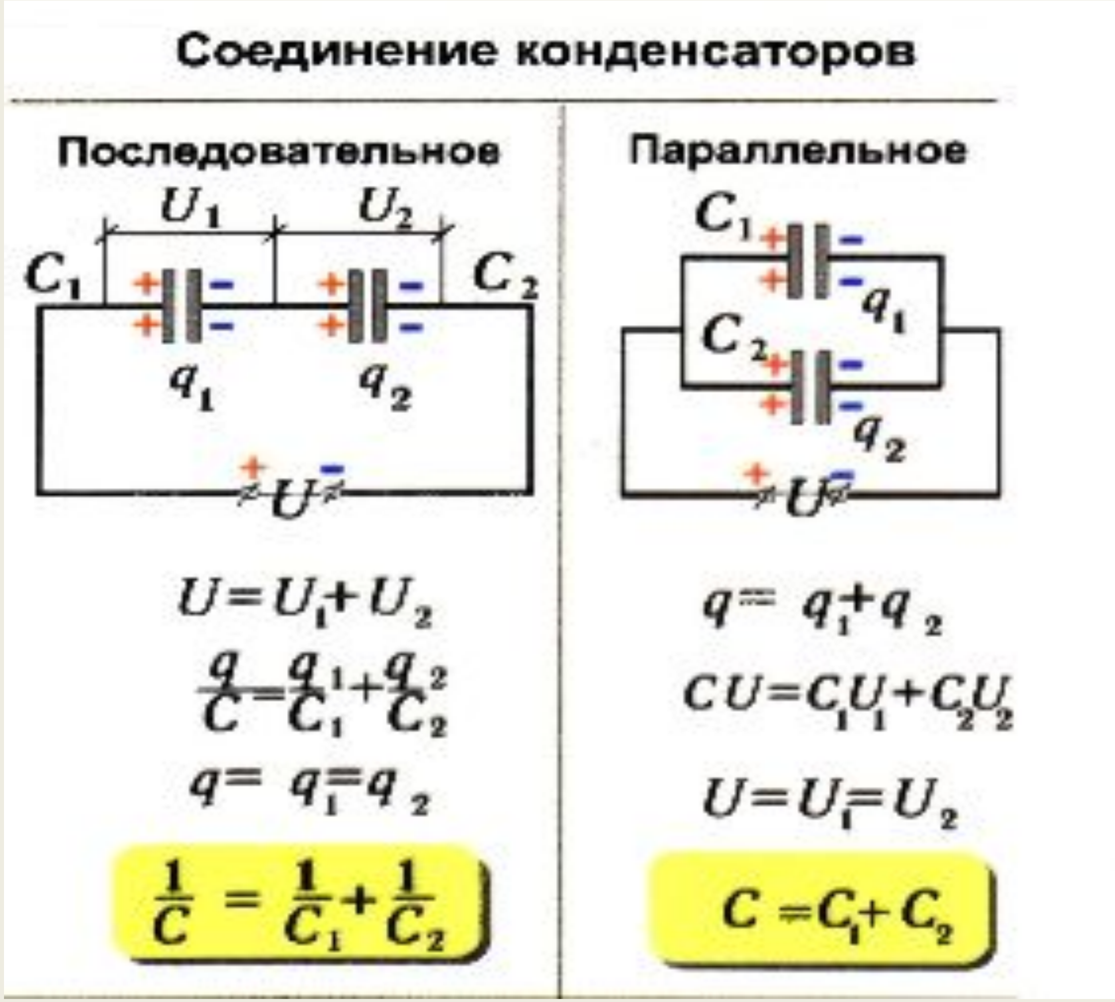


рис.3.6

Если между пластинами конденсатора есть среда с диэлектрической проницаемостью ε, тогда электроемкость такого конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (3.4)$$



3.4 Энергия системы точечных зарядов и заряженного уединенного проводника.

Потенциальная энергия системы из 2-х зарядов численно равна работе по удалению их на ∞-е расстояние друг от друга.

$$W_p = q_1\varphi_1 = q_2\varphi_2 = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2)$$

Если число зарядов в системе произвольно, энергия i-го заряда

$$Wpi = q_i \cdot \varphi_i$$

Здесь φ_i -потенциал, созданный остальными зарядами в той точке, где находится *i*-й заряд.

Для всей системы:

$$Wp = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(\varphi_i \cdot q_i) \quad (3.5)$$

Найдем **энергию заряженного уединенного проводника**, представив его заряд Q как систему точечных зарядов. Поверхность проводника эквипотенциальна. Поэтому потенциалы точек, в которых находятся точечные заряды q_i, одинаковы φ (обозначим их):

$$W_p = \frac{1}{2}\sum_i q_i\,\varphi = \frac{\varphi}{2}\sum_i q_i = \frac{\varphi Q}{2}\,.$$

Энергию заряженного уединенного проводника можно представить в виде

$$\boxed{W_p = \frac{\varphi Q}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2}.} \qquad (3.6)$$

3.4 Энергия заряженного конденсатора. Энергия и объемная плотность энергии электрического поля.

Энергия поля конденсатора:

$$W_E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2$$

Выразим энергию поля конденсатора через напряженность поля конденсатора.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \qquad \sigma = \frac{Q}{S} \qquad C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}$$

$$W_E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{\sigma^2 \cdot S^2}{2C} = \frac{\sigma^2 \cdot S^2 d}{2\varepsilon_0 S} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2 \cdot Sd = \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 \cdot V$$

$V = Sd$ - объем пространства между пластинами конденсатора.

Объемная плотность энергии электростатического поля конденсатора

$$\omega_E = \frac{W_E}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$ (измеряется в Дж/м^3)

Понятие объемной плотности энергии относится к любому электрическому полю, в том числе неоднородному и характеризует энергию поля в окрестности данной точки пространства.

$$\omega_E = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{W_E}{V}$$ -- (элемент объема стягивается в точку)

Объемную плотность энергии можно записать иначе:

$$\omega_E = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

В анизотропном диэлектрике векторы Е и D не совпадают по направлению.

Выражение для объемной плотности энергии произвольного электрического поля в произвольной среде: $\omega_E = \frac{ED}{2}$