

3. Проводники и

электростатическое поле

Проводниками называются тела, имеющие практически неограниченный свободный заряд. Типичными проводниками являются металлы, концентрация свободных носителей – электронов – в них \sim

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**.

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 компенсировать внешнее поле любой реально достижимой величины.

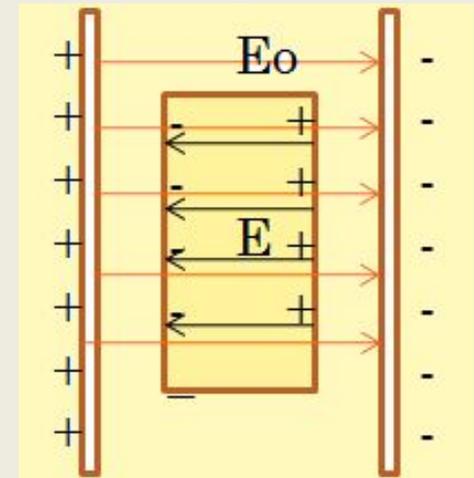
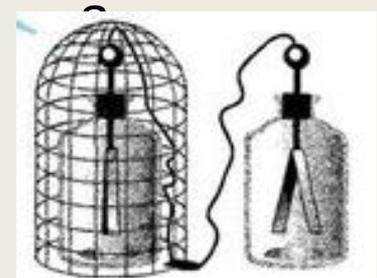


Рис.3.1



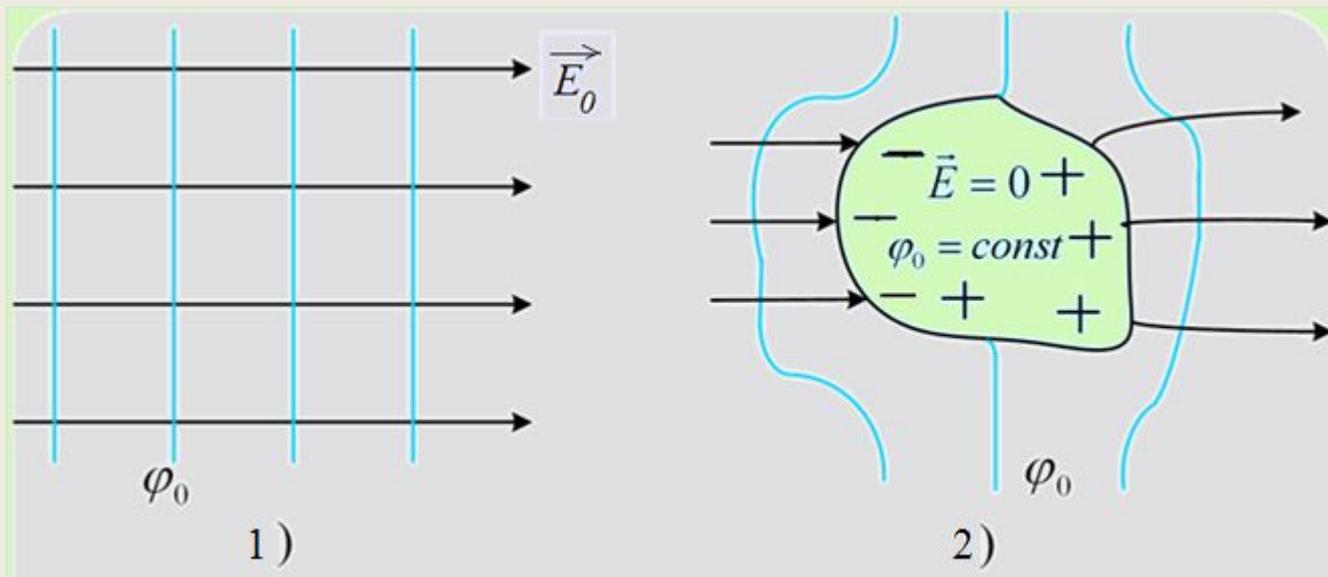


рис.3.1
При этом весь
объем проводника
будет
эквипотенциальным

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).

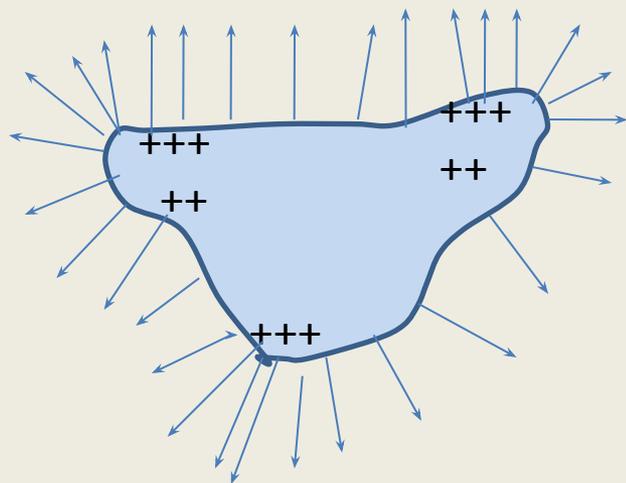


рис.3.
2

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 $\varphi_0 = \text{const}$,
- 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.

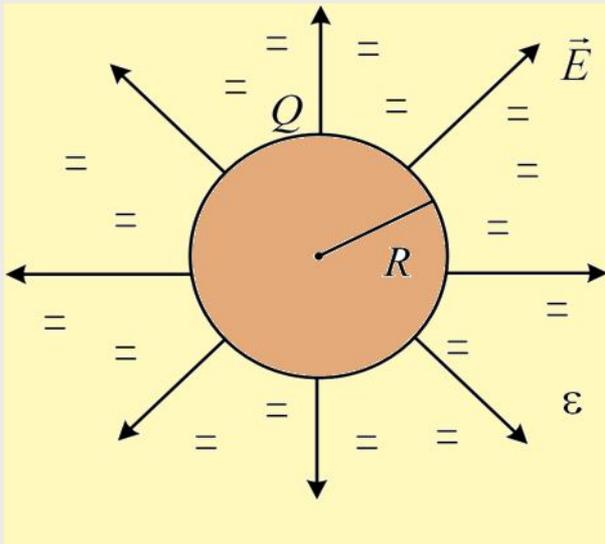
При сообщении дополнительного заряда q потенциал проводника увеличится, причем изменение потенциала $\Delta\varphi$ пропорционально дополнительному заряду $q = C \cdot \Delta\varphi$, при этом коэффициент пропорциональности

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} \quad (3.2)$$

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

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} ; \varphi = \frac{q}{C}$$

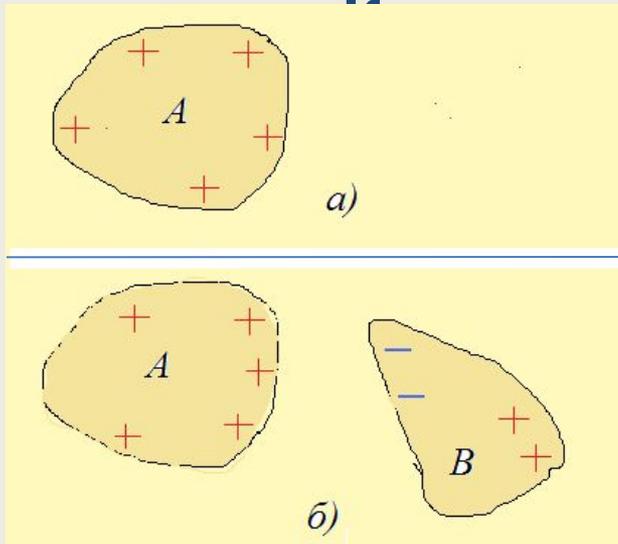
Отсюда следует: емкость шара зависит только от его радиуса и окружающей среды.

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R \quad (3.3)$$

рис.3.
4

3.3 Взаимная емкость

Конденсаторы.



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 заряды индуцированные.

рис.
3.5

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

$$q = C\varphi = \text{const} \quad \text{то } C \uparrow.$$

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 потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$

, 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 небольших накапливать значительный заряд называются конденсаторами.

$\Delta\varphi$

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

$$d \ll \sqrt{s}$$

Емкость конденсатора – это взаимная емкость его обкладок

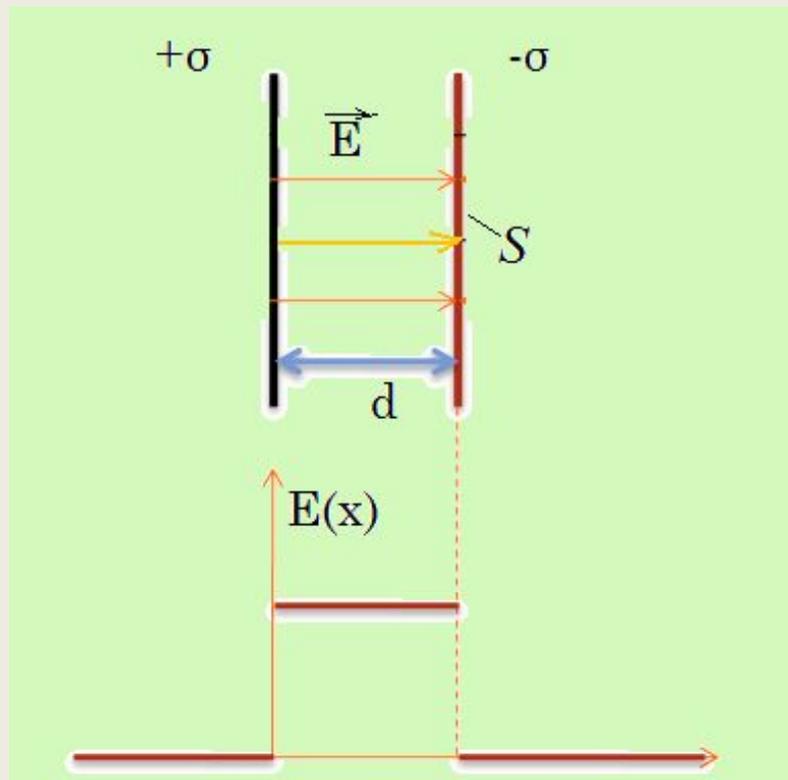
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

Конденсаторы бывают плоские, цилиндрические и сферические. Емкость плоского конденсатора (рис.3.6) :

Все поле сосредоточено между плоскостями, оно является однородным

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

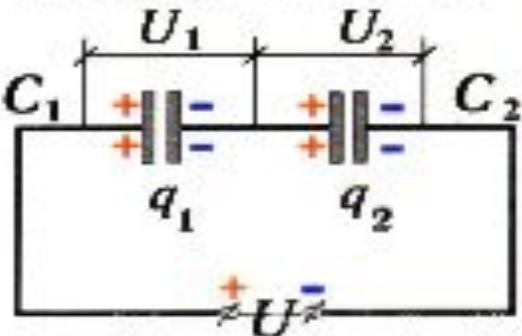
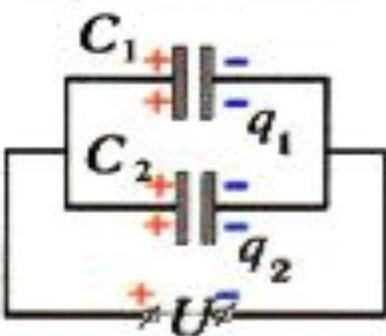
рис.3.
6



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

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

Соединение конденсаторов

Последовательное	Параллельное
	
$U = U_1 + U_2$ $\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}$ $q = q_1 = q_2$	$q = q_1 + q_2$ $CU = C_1 U_1 + C_2 U_2$ $U = U_1 = U_2$
<div style="background-color: yellow; padding: 5px; border: 1px solid black; display: inline-block;"> $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ </div>	<div style="background-color: yellow; padding: 5px; border: 1px solid black; display: inline-block;"> $C = C_1 + C_2$ </div>

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

$$W_{pi} = q_i \cdot \varphi_i$$

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

Для всей
системы:

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

Найдем **энергию заряженного уединенного проводника**,

представив его заряд Q как систему точечных зарядов.

Поверхность проводника эквипотенциальна. Поэтому потенциалы

точек, в которых находятся точечные заряды, одинаковы φ

(обозначим их φ):

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

Энергию заряженного уединенного проводника можно представить в виде

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

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.

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

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

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

Объемная плотность энергии электростатического поля конденсатора

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

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

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

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 E и D не совпадают по направлению.

Выражение для объемной плотности энергии произвольного электрического

поля в произвольной среде: $\omega_E = \frac{\overline{ED}}{2}$