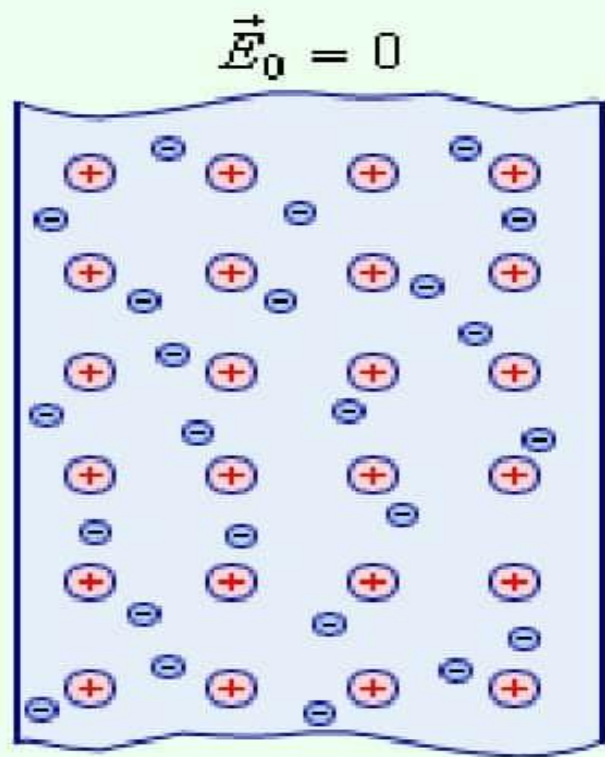
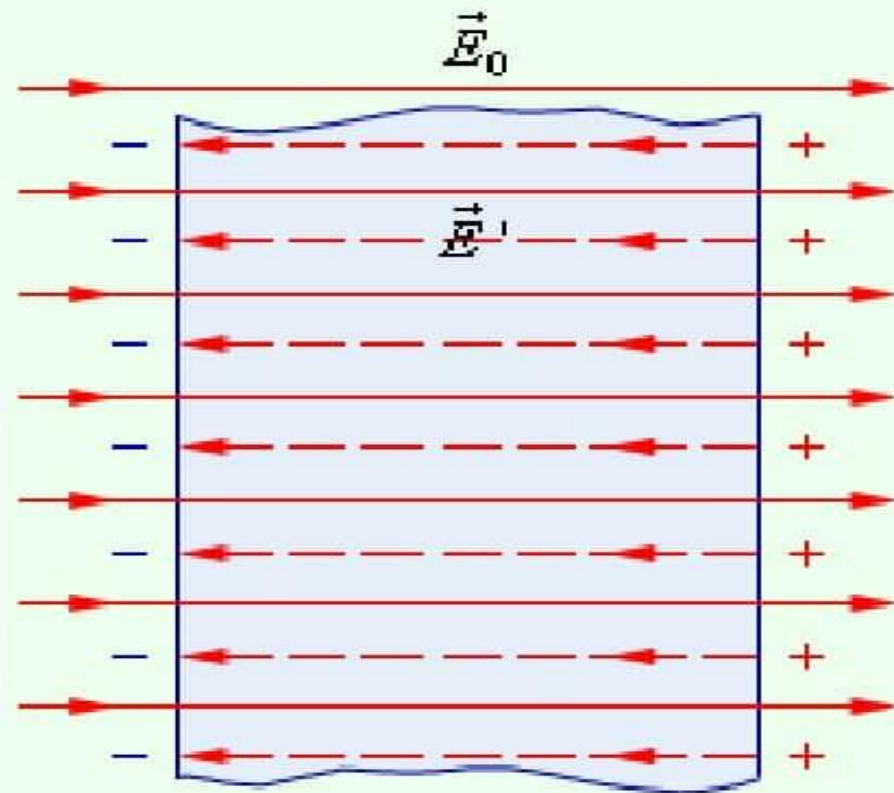


# Электрический заряд для заряженных и незаряженных проводников.

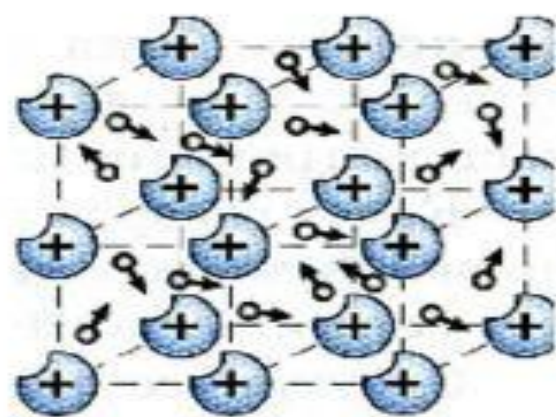


внутри  
проводника  
 $q = 0$

весь  
статический  
заряд  
проводника  
расположен  
на его  
поверхности



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$$



## Проводники в электрическом поле

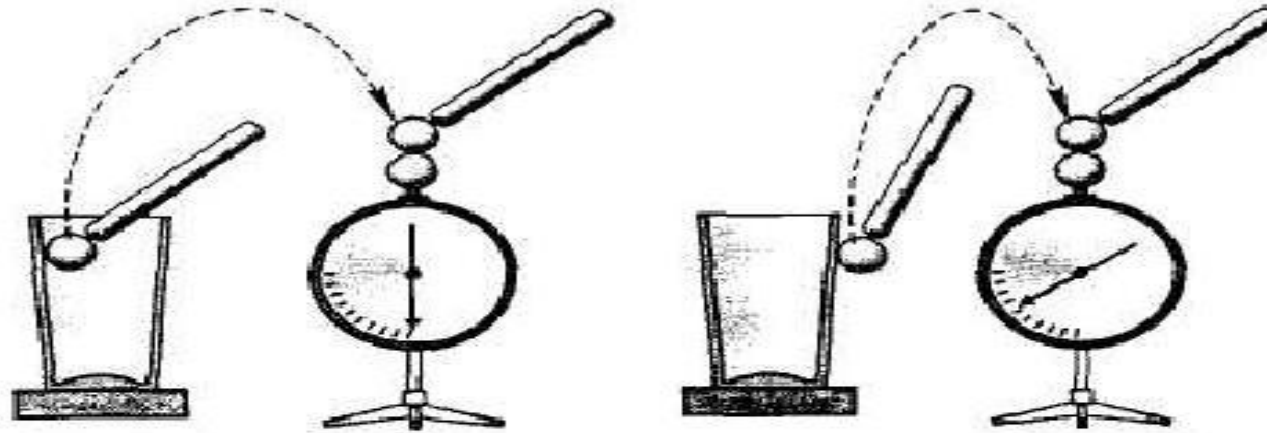
Проводниками являются металлы, электролиты (растворы, проводящие ток) плазма.

**В металлах** носителями зарядов являются свободные электроны,

**в электролитах** – положительные и отрицательные ионы,

**в плазме** – свободные электроны и ионы.

Распределение зарядов на поверхности проводника можно показать, взяв заряженный полый металлический стакан и коснувшись пробным шариком его внутренней и внешней поверхностей, перенести пробный шарик к незаряженному электроскопу.



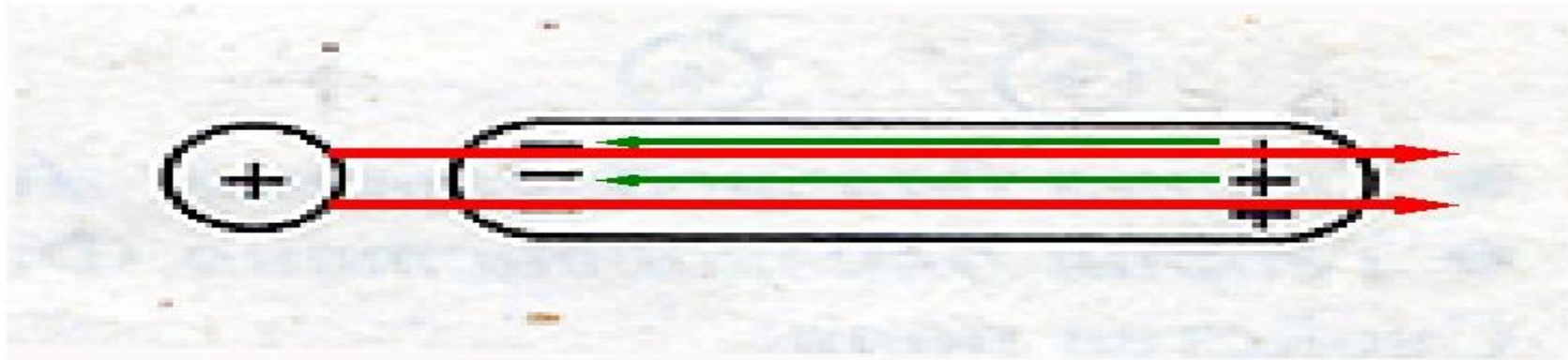
В первом случае пробный шарик не зарядился (левый рисунок), во втором - зарядился.

## Электростатическое поле внутри проводника.

Внутри проводника электростатического поля нет ( $E = 0$ ), что справедливо для заряженного проводника и для незаряженного проводника, внесённого во внешнее электростатическое поле.

### Почему?

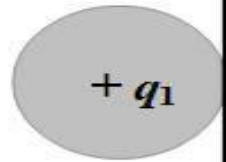
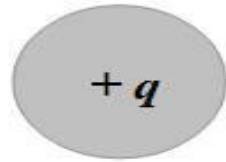
т.к. существует явление разделения зарядов в проводнике, внесённом в электростатическое поле ( $E_{\text{внешн}}$ ) с образованием нового электростатического поля ( $E_{\text{внутр}}$ ) внутри проводника.



Внутри проводника оба поля ( $E_{\text{внешн}}$  и  $E_{\text{внутр}}$ ) компенсируют друг друга, тогда в итоге внутри проводника  $E = 0$ .



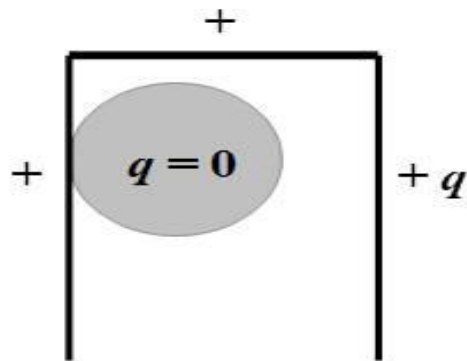
**Металлический шарик**



$$\varphi_1 = \varphi_2$$



+  $q_2$

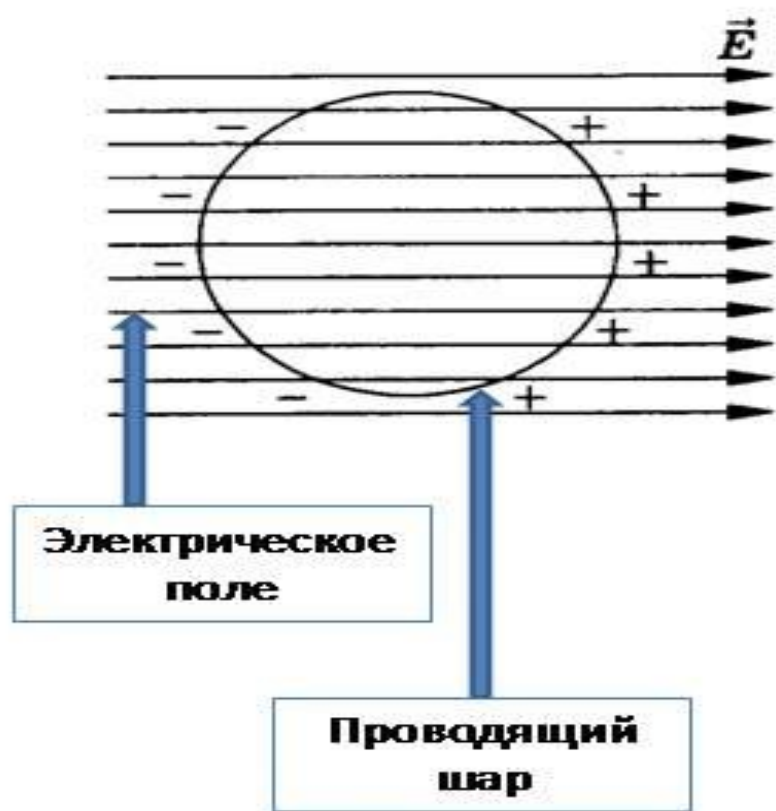


Заряженный шарик приводится в соприкосновение с поверхностью какого-либо проводника. Заряд шарика частично передается проводнику.

Шарик соприкасается с внутренней поверхностью полого проводника. Внутри проводника избыточного заряда не должно быть и весь заряд шарика передается проводнику и распределяется на внешней поверхности последнего.

# Проводники

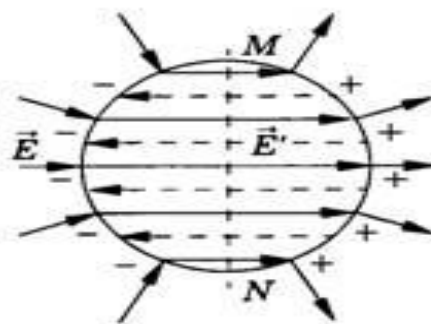
## уничтожение электростатического поля в проводнике



Сначала возникнет электрический ток, так как поле внутри шара вызывает перемещение электронов



Части шара заряжаются по-разному:  
Левая – отрицательно; Правая – положительно  
(явление электростатической индукции)



Эти заряды на поверхности проводника создают электрическое поле, которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ПРОВОДНИКЕ

внутри проводника

$$\vec{E} = 0$$

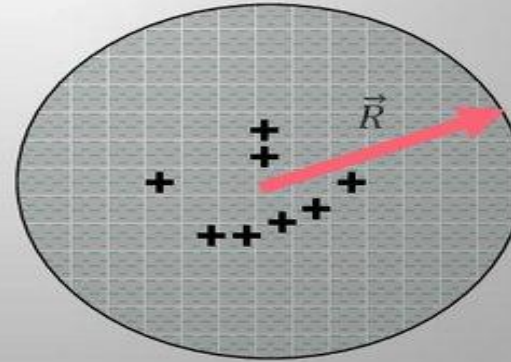
$$\phi = \text{const}$$

На поверхности и вне проводника

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

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{r}$$

Заряженный  
проводник



На поверхности проводника

$$\vec{r} = \vec{R}$$

На поверхности и внутри проводника

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{R}$$

## 1. Распределение зарядов в проводнике

**Проводники** – тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему объему под действием сколь угодно малой силы.

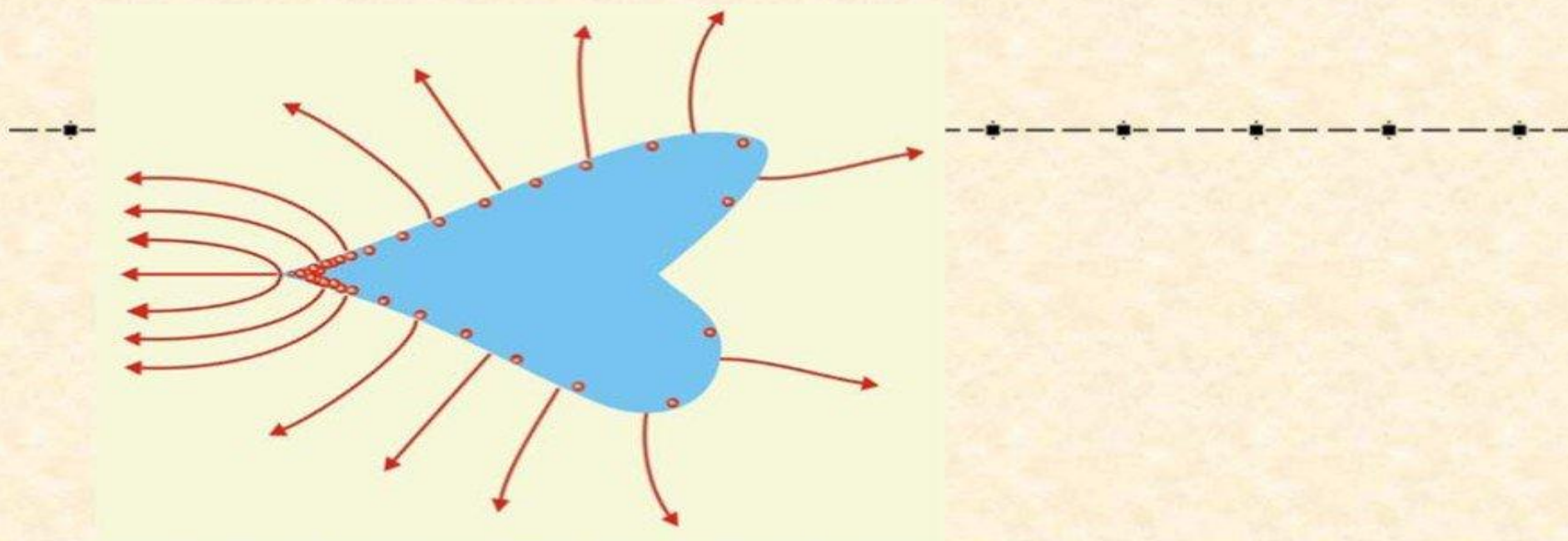
**Условия равновесия зарядов в проводнике:**

- 1) Напряженность поля внутри проводника должна быть равна нулю. Т.е. потенциал внутри проводника постоянный.
- 2) Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности. Т.е. поверхность проводника будет эквипотенциальной.

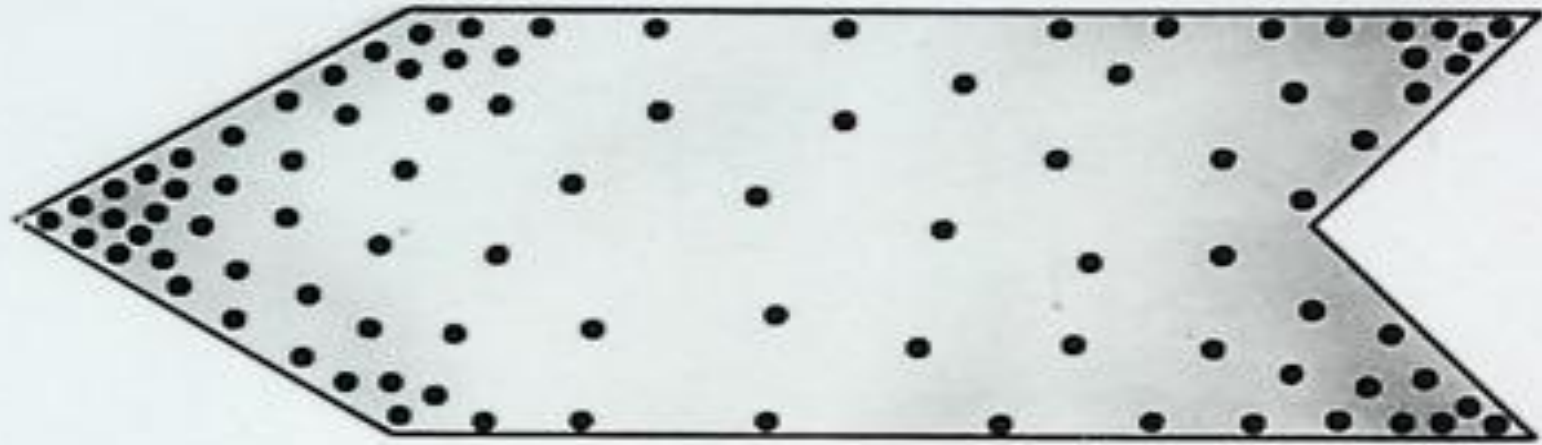
При равновесии внутри проводника нет зарядов, они распределены по поверхности. Плотность зарядов определяется кривизной поверхности проводника – растет с увеличением положительной кривизны.

Напряженность поля вблизи остриев может быть так велика, что **ионизируются молекулы газа**, окружающего проводник.





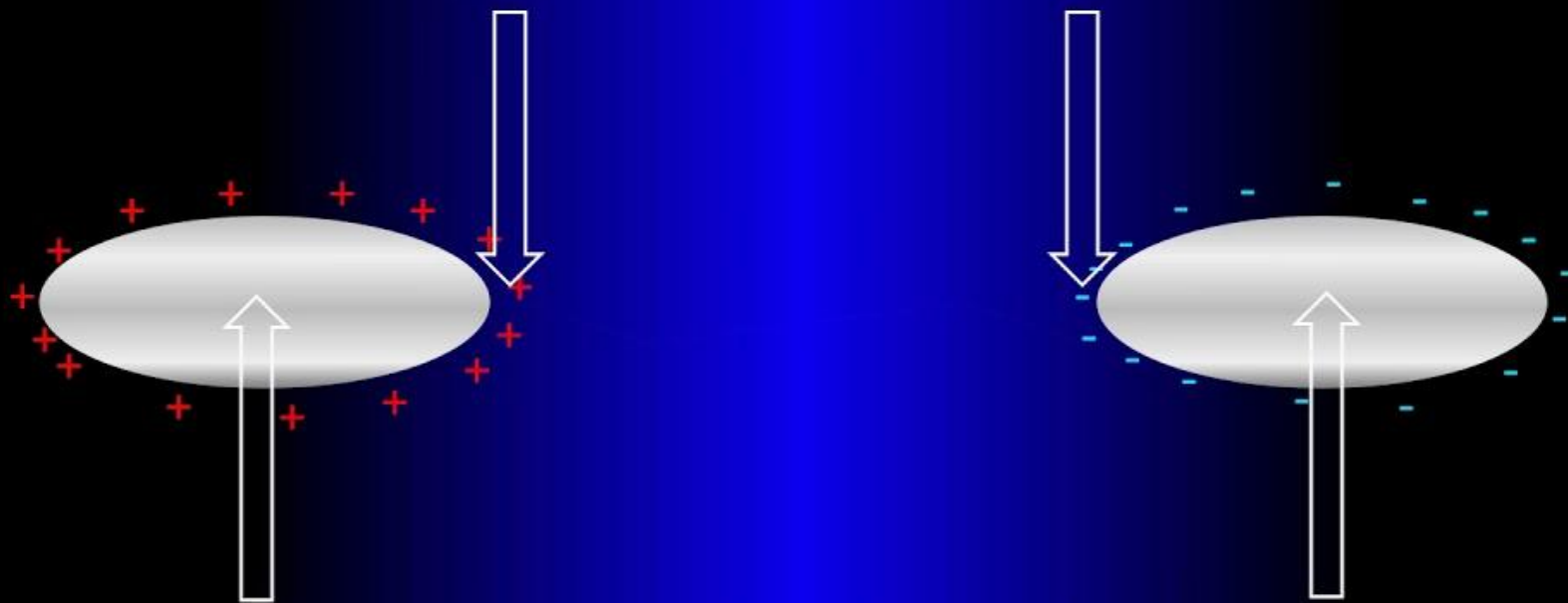
**Распределение зарядов на поверхности проводников зависит от их формы. Максимальная плотность зарядов наблюдается на заострениях, а внутри углублений сводится к минимуму.**



Плотность зарядов зависит от кривизны поверхности проводника: где больше кривизна поверхности, там больше плотность зарядов. Особенно возрастает плотность зарядов вблизи острых выступов.

## 4. Распределение заряда по поверхности проводника

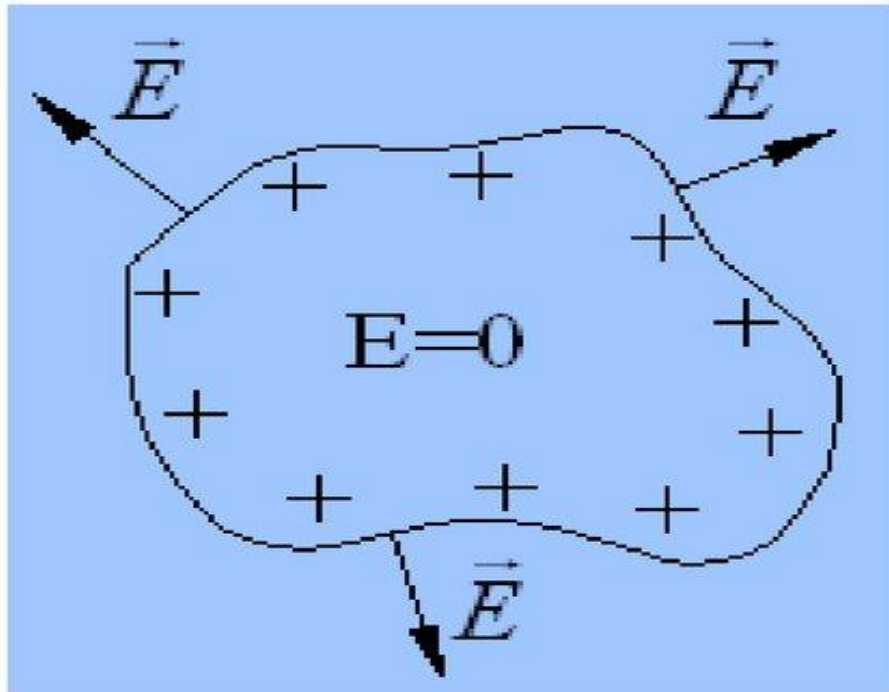
Максимальная концентрация заряда по краям проводников



Минимальная концентрация заряда по центру проводников

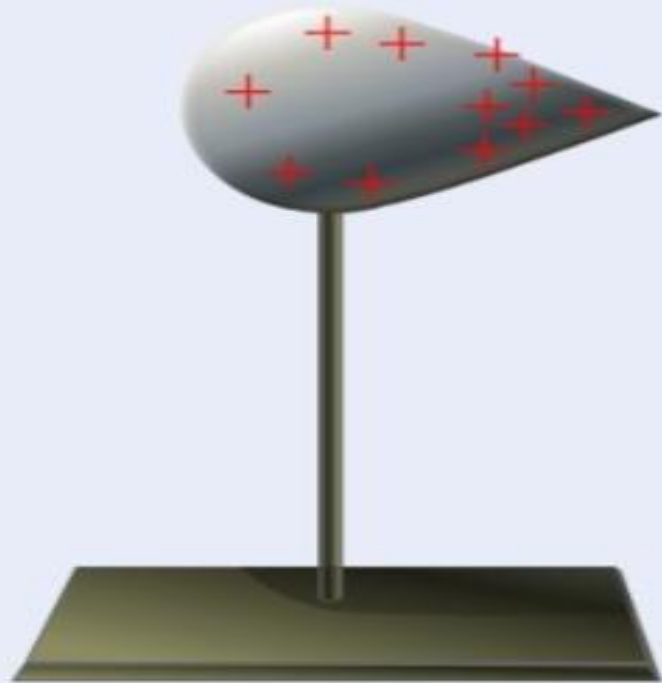


## Распределение зарядов на проводнике



- Заряды, сообщённые проводнику, распределяются по его поверхности
- Напряжённость поля внутри проводника равна 0
- Линии напряжённости электростатического поля перпендикулярны его поверхности



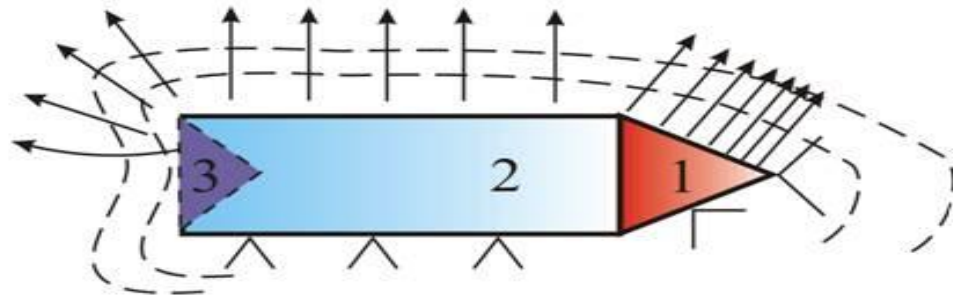


**Заряд на поверхности проводника сложной формы распределяется неравномерно: на острых частях плотность заряда больше.**

## 8.3. Экспериментальная проверка распределения заряда на проводнике

Проверим экспериментально сделанные нами выводы:

### 1. Заряженный кондуктор (рис. 8.3).



В местах разной напряженности электростатического поля лепестки бумажки расходятся по-разному:

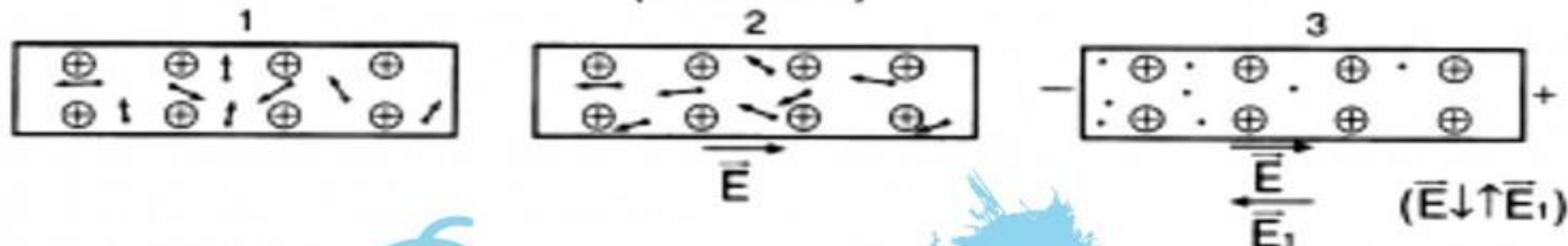
на поверхности 1 – максимальное расхождение,

на поверхности 2 заряд распределен равномерно  $q = const$  и имеем одинаковое расхождение лепестков.

*Электрометр* – прибор, с помощью которого измеряют заряд и потенциал кондуктора. Если сообщить электрометру заряд с острия, то будет максимальное отклонение стрелки электрометра; с поверхности 2 – отклонение будет меньше; и нулевое отклонение с поверхности 3 внутри кондуктора.

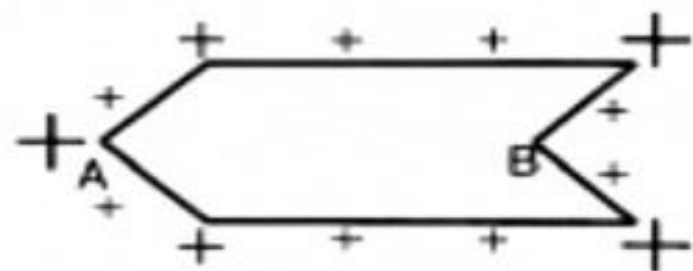
# ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

(металлы)



1. Электростатического поля внутри проводника нет.
2. Силовые линии электростатического поля вне проводника перпендикулярны его поверхности.
3. Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности.

## Распределение заряда

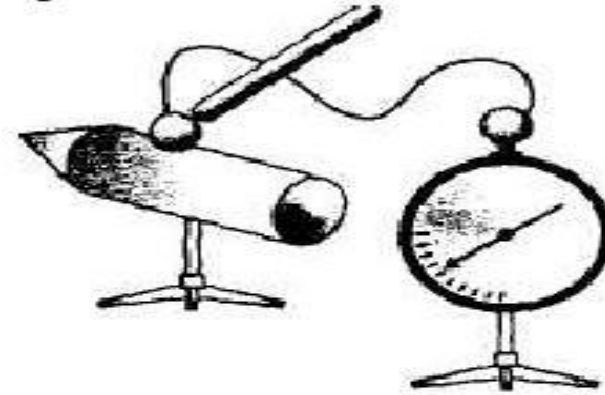
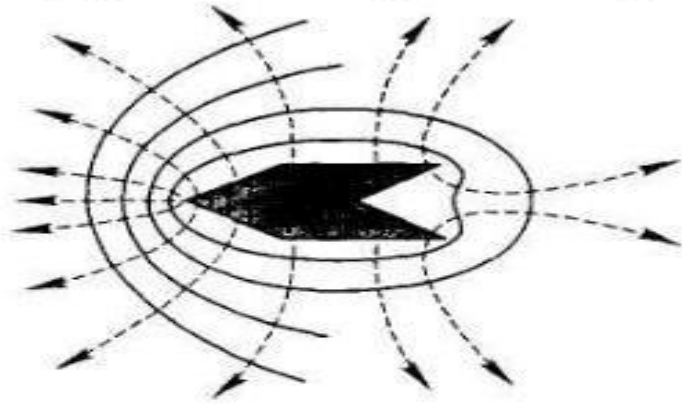


$\sigma_A$  - max

$\sigma_B$  - min

На остриях заряженного проводника поверхностная плотность электричества значительно увеличивается.

Эквипотенциальность поверхности проводника можно подтвердить, взяв цилиндрический *заряженный* проводник с коническим выступом на одном основании и такой же впадиной на другом и водить по нему пробным шариком на изолирующей ручке, соединенным с электроскопом. При перемещении шарика по наружной и внутренней поверхности проводника показания электрометра *одинаковы*



Здесь показан вид линий напряженности (пунктирные линии) и сечений эквипотенциальных поверхностей (сплошные линии) заряженного положительно металлического цилиндра, имеющего на одном конце выступ, а на другом – впадину.

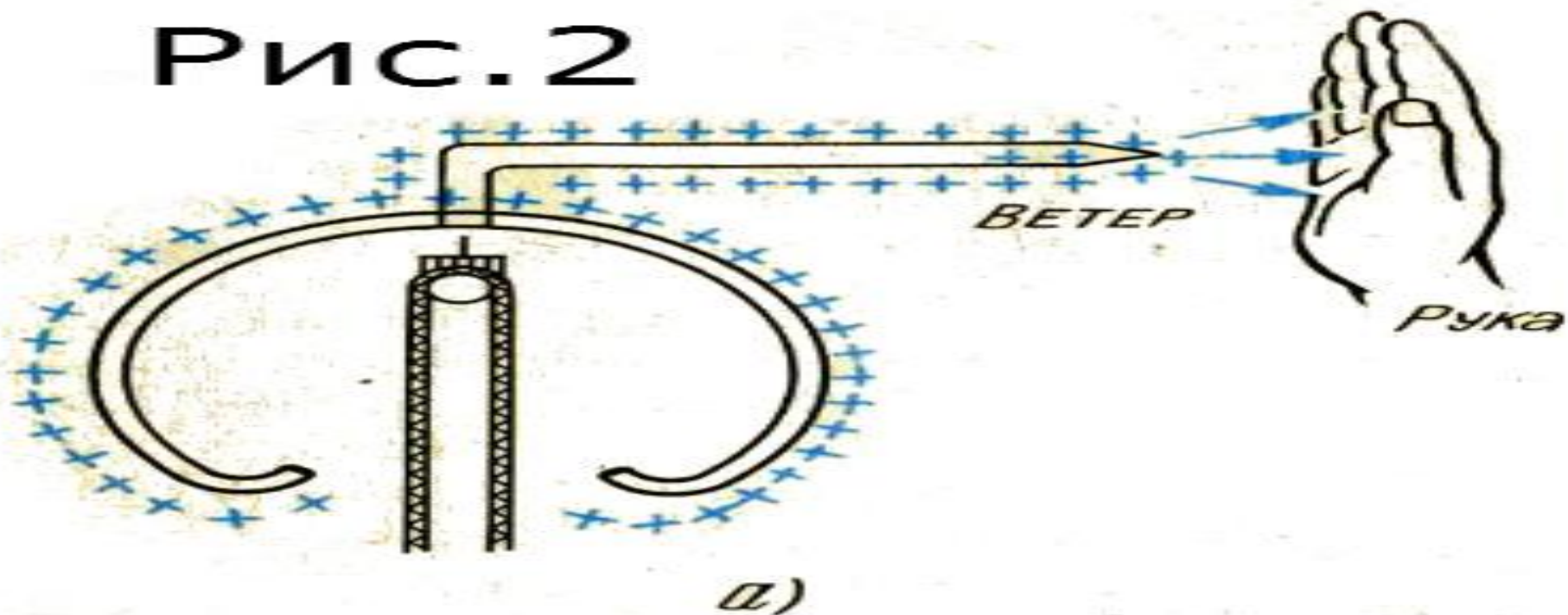
Вблизи острия и выступов эквипотенциальные поверхности расположены гуще. А это означает, что там и напряженность поля больше. Соответственно на острие и выступах поверхностная плотность зарядов больше, чем на других участках поверхности цилиндра. В области впадины напряженность поля и поверхностная плотность зарядов минимальны.



# Распределение зарядов



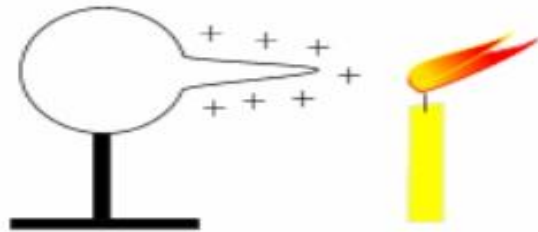
# Рис. 2





## \* Выводы из опытов:

Сетка Б.Ю.Кольбе



\* 1. **Заряды** распределяются по **внешней** поверхности проводника (1729г англ. С.Грей)

\* 2. **Максимальный заряд** распределён на поверхности **наибольшей кривизны** (Заряд стекает с острия – **разрядник**)

\* 3. **Внутри** проводника **напряжённость** поля равна **нулю**.  $E = 0$ , поэтому  $1 - 2 = 0$ ,

\* 4. **Потенциалы** всех точек проводника **одинаковы**  $1 = 2$ , т. е. поверхность проводника в электростатическом поле является **ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНОЙ**.

Перемещение зарядов будет происходить до тех пор, пока внешнее электростатическое поле не скомпенсируется полем, возникающим внутри проводника.

$$E = E_{\text{н}} \quad (E_{\text{з}} = 0)$$

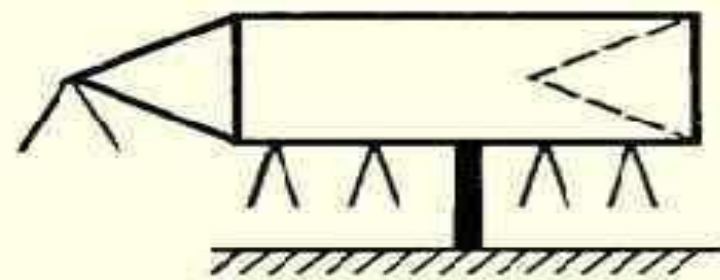
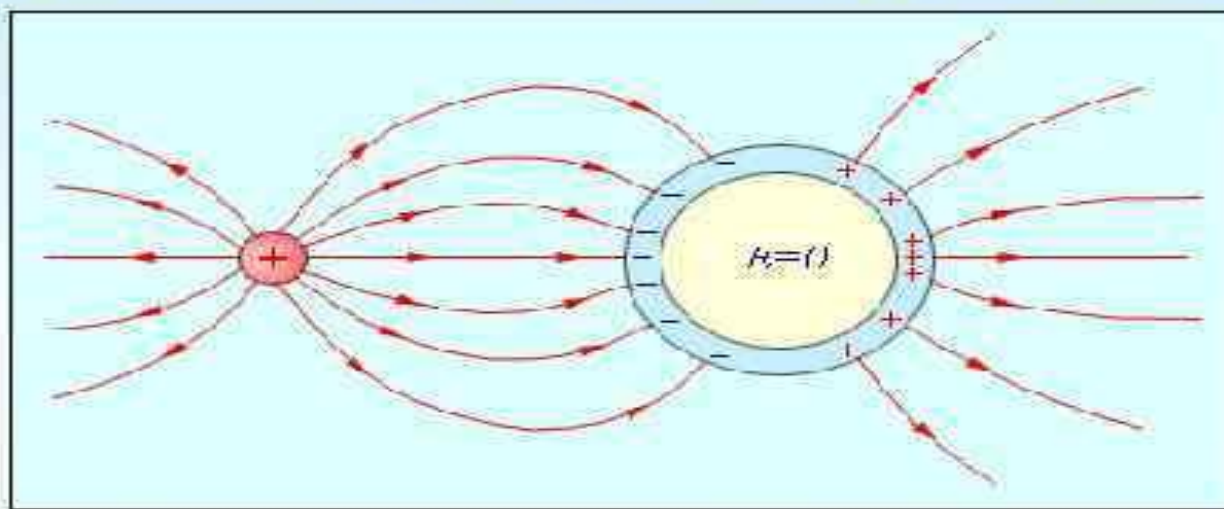
### Электростатическая защита (экранизация)

Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его

поверхности индуцированными (наведенными) зарядами.

3. Во всех точках внутри проводника напряженность электрического поля равна нулю (внутри проводника поле отсутствует).

4. Плотность заряда растет с увеличением положительной кривизны (выпуклости) поверхности и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости). Особенно велика плотность заряда на остриях.





## Проводники в электростатическом поле

### *Электростатические свойства однородных металлических проводников.*

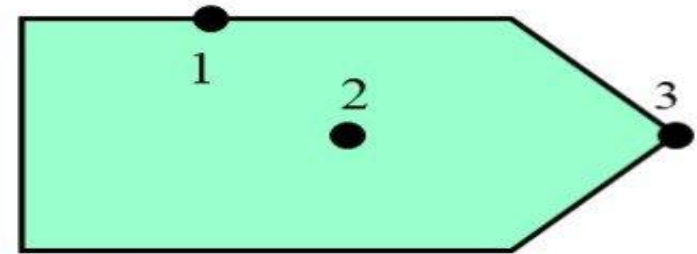
1. При помещении проводника во внешнее электростатическое поле наблюдается явление электростатической индукции – появление на противоположных сторонах проводника электрических зарядов разных знаков.
2. Внутри проводника электрический заряд отсутствует; весь статический заряд проводника, полученный им при электризации, может располагаться только на его поверхности.
3. Электрические заряды распределяются по поверхности проводника так, что электростатическое поле оказывается сильнее на выступах проводника и слабее на его впадинах.
4. Если внутри проводника имеется полость, то в каждой точке этой полости напряженность электростатического поля равно нулю (теорема Фарадея).
5. Напряженность электростатического поля на внешней поверхности проводника направлена перпендикулярно к этой поверхности.
6. Во всех точках внутри проводника потенциал электростатического поля имеет одно и то же значение.
7. Если заряженный проводник имеет форму шара или сферы радиусом  $R$ , то напряженность и потенциал создаваемого им поля определяются выражениями:

$$E = \begin{cases} 0, \text{ если } r < R \\ k \frac{q}{r^2}, \text{ если } r \geq R \end{cases}$$

$$\varphi = \begin{cases} k \frac{q}{R}, \text{ если } r \leq R \\ k \frac{q}{r}, \text{ если } r > R \end{cases}$$

## Электростатическое поле в веществе

Проводнику, изображенному на рисунке сообщили положительный заряд. Сравните электрический потенциал ( $\varphi$ ) в различных точках проводника.



- 1)  $\varphi_3 = \varphi_2 = \varphi_1 = 0$       2)  $\varphi_1 = \varphi_3 > \varphi_2$       3)  $\varphi_3 = \varphi_2 = \varphi_1 > 0$       4)  $\varphi_3 > \varphi_1 > \varphi_2$

Если проводнику сообщен электрический заряд, то:

- Заряд распределяется в тонком слое на поверхности проводника, так что **напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю.**
- **Потенциал всех точек внутри проводника и на его поверхности одинаков.** →

$$\varphi_3 = \varphi_2 = \varphi_1$$

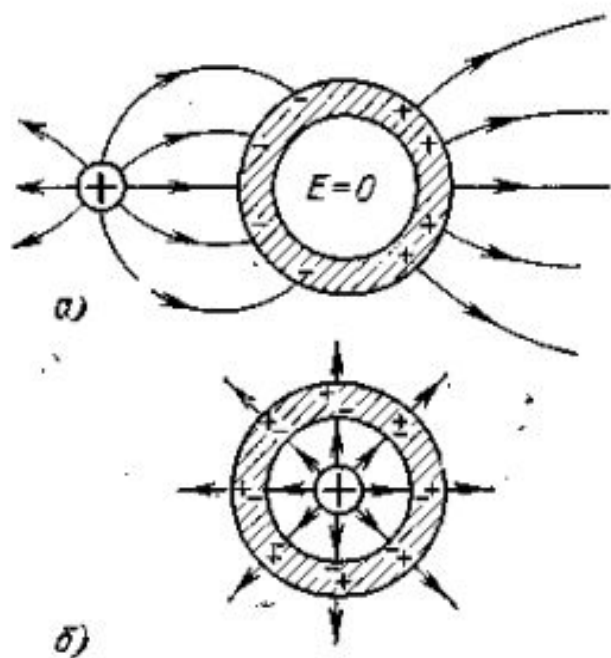
Так как проводник заряжен положительно, то  $\varphi > 0$ .

- Наибольшая плотность заряда будет в наиболее удаленных точках проводника с максимальным радиусом кривизны (т.е. на остриях).

$$\sigma_3 > \sigma_1$$



Если удалить вещество из внутренней области проводника, то распределение его заряда не изменится – **в полом проводнике также как и в сплошном заряды располагаются только на внешней поверхности**, а на внутренней, как и во всем объеме  $E = 0$ .



а) Индуцированные заряды будут сосредоточены только на внешней поверхности. Поле внутри полости и в толще металла равно нулю. Поэтому **полый металлический проводник экранирует электрическое поле всех внешних зарядов** (этим пользуются на практике для устройства электростатической защиты).

б) **Полый проводник не экранирует поле электрических зарядов, помещенных внутри полости.** Индуцированные заряды распределятся так, что полное поле, создаваемое внесенным зарядом и индуцированными зарядами будет равно нулю в толще металла. Однако внутри полости поле не будет равно 0.

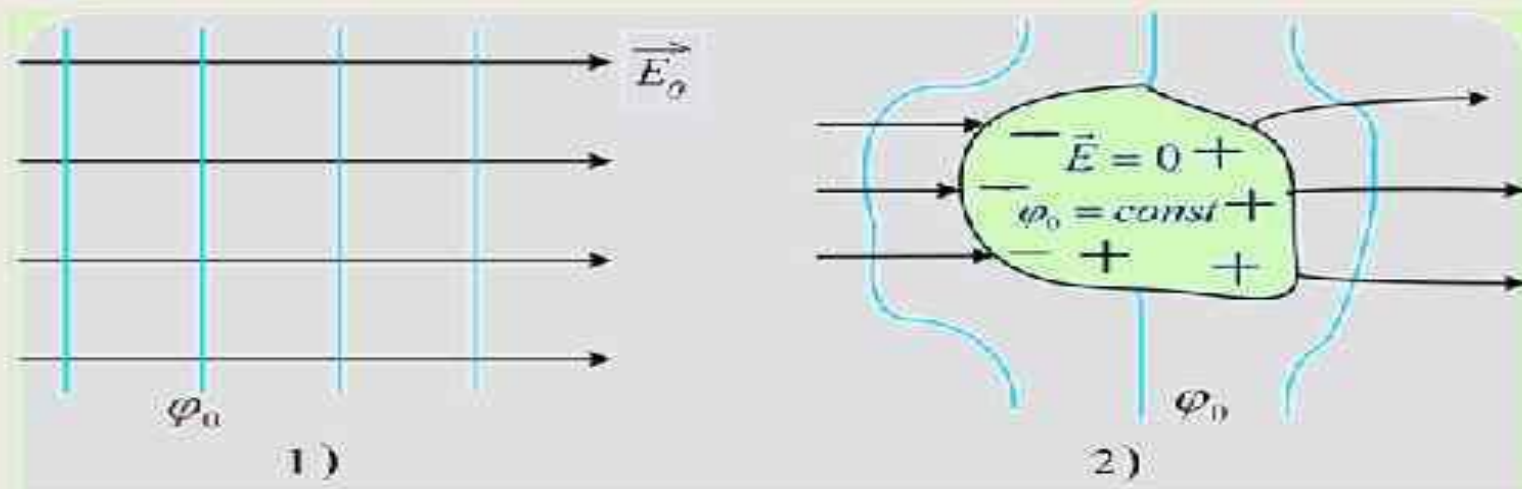


рис.3.16

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).

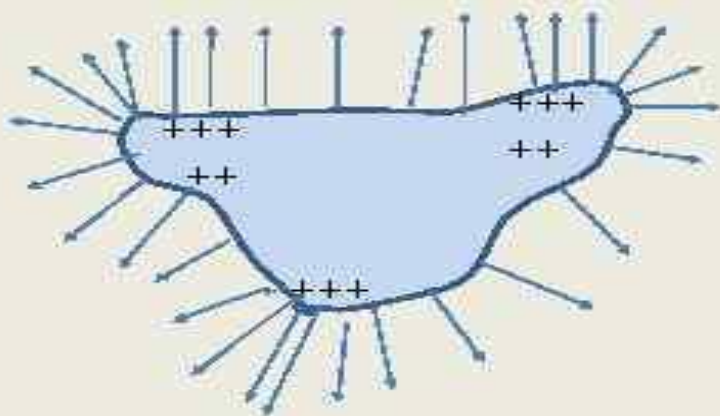


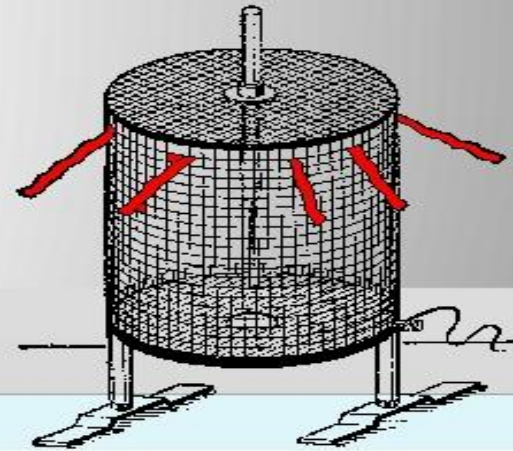
рис.3.2





## Электростатическая защита

- В состоянии равновесия избыточных зарядов внутри проводника нет – вещество внутри проводника электрически нейтрально.
- Внешние заряды, в частности заряды на наружной поверхности проводника не создают в полости внутри проводника никакого электрического поля.
- Электростатическая защита – экранирование тел, например измерительных приборов, от влияния внешних электростатических полей.
- Практически сплошной проводник-оболочка может быть заменен достаточно густой металлической сеткой.



**Линейная плотность заряда**, равномерно распределенного по нити, равна отношению заряда нити к ее длине

$$\tau = \frac{q}{l}$$

$$[\tau] = \frac{Кл}{м}$$

**Поверхностная плотность заряда**, равномерно распределенного по поверхности, к площади этой поверхности

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$$[\sigma] = \frac{Кл}{м^2}$$

**Объемная плотность заряда**, равномерно распределенного в объеме равна отношению заряда к объему по которому он распределен

$$\rho = \frac{q}{V}$$

$$[\rho] = \frac{Кл}{м^3}$$

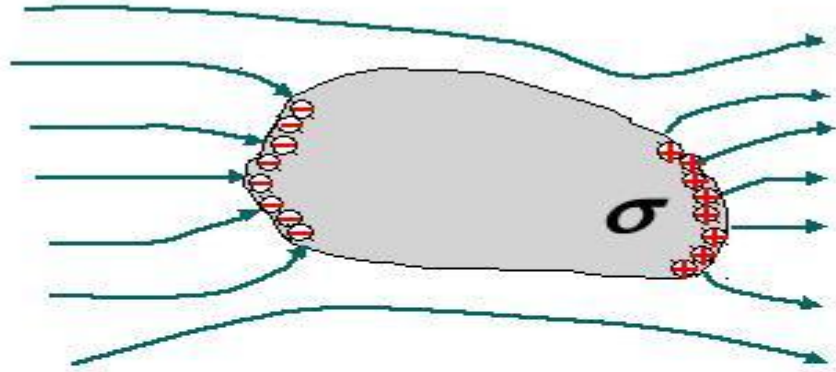


## Поле вблизи поверхности заряженного проводника

- Распределение зарядов по внешней поверхности проводника зависит только от её формы.
- На внутренней поверхности замкнутых полых проводников избыточные заряды отсутствуют и поверхностная плотность зарядов  $\sigma = 0$ .



## ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.



Заряды располагаются в поверхностном тонком слое проводника и характеризуются поверхностной плотностью  $\sigma$

Во всех точках проводника, включая его поверхность, значение потенциала одинаково. Проводник *эквипотенциален*

Если внутри проводника имеется полость, то поле внутри полости отсутствует. Эффект электростатической защиты.

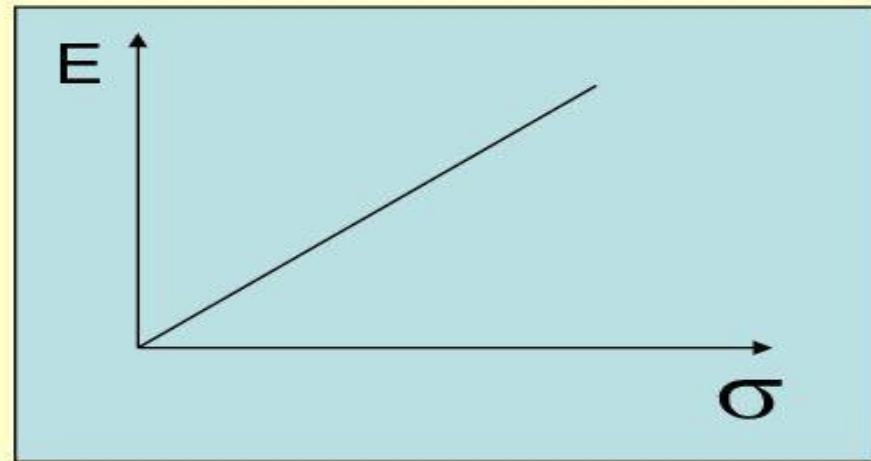
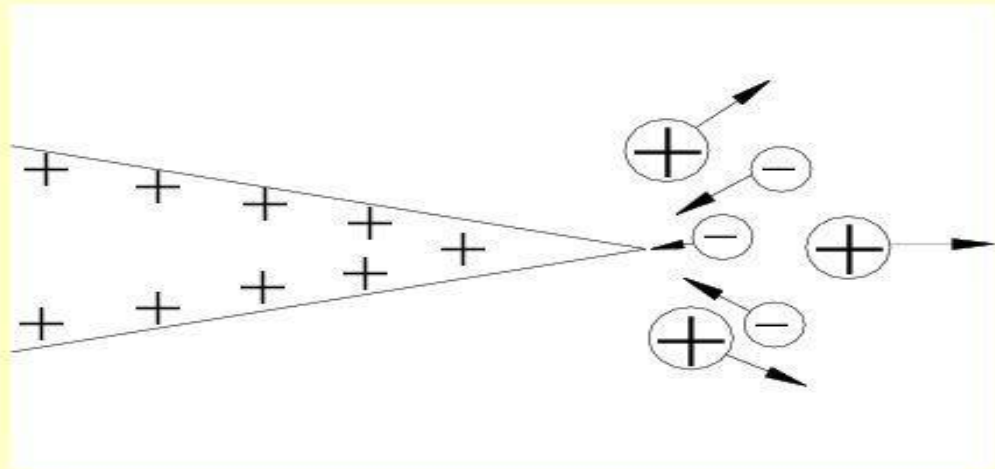
На близком расстоянии к поверхности проводника напряженность поля выражается соотношением

$$E = \sigma / \epsilon\epsilon_0$$



Чем больше поверхностная плотность заряда на поверхности проводника, тем большую напряженность поля он создает вблизи поверхности.

Величина поверхностной плотности заряда  $\sigma$  определяется радиусом кривизны поверхности  $r$ : чем меньше  $r$ , тем больше  $\sigma$ , тем больше  $E$ .



Если внутри проводника имеется полость, то поле внутри полости отсутствует. Эффект электростатической защиты.

**Напряжённость поля вблизи поверхности заряженного проводника прямо пропорциональна поверхностной плотности зарядов.**

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

### **Электроемкость уединенного проводника**

Различные по величине заряды распределяются на уединённом проводнике **подобным** образом (отношение плотностей заряда в двух произвольных точках поверхности проводника при любом заряде будет одним и тем же).

Коэффициент пропорциональности между потенциалом и зарядом называется **электроёмкостью**

$$q = C \cdot \varphi$$

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

**Ёмкость численно равна заряду, сообщение которого проводнику вызывает повышение его потенциала на единицу.**

Единица электроемкости – **фарад**.

Свойство зарядов располагаться на внешней поверхности проводника используется для устройства электростатических генераторов, предназначенных для накопления больших зарядов и достижения разности потенциалов в несколько миллионов вольт. Электростатический генератор, изобретенный американским физиком Р. Ван-де-Граафом (1901—1967), состоит из шарообразного полого проводника 1 (рис. 4), укрепленного на

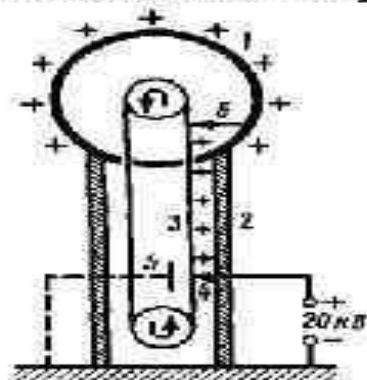
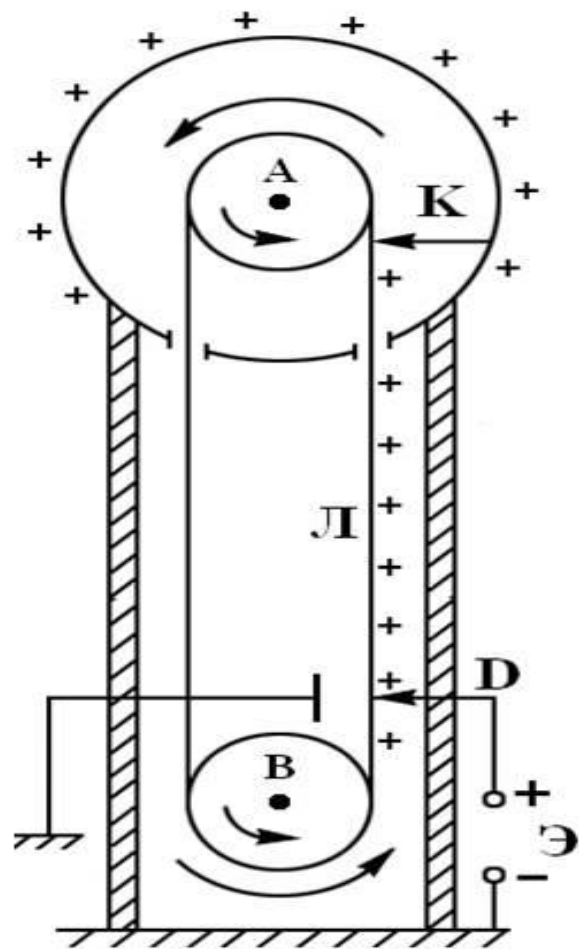


Рисунок 4

изоляторах 2. Движущаяся замкнутая лента 3 из прорезиненной ткани заряжается от источника напряжения с помощью системы остриев 4, соединенных с одним из полюсов источника, второй полюс которого заземлен. Заземленная пластина 5 усиливает стекание зарядов с остриев на ленту. Другая система остриев 6 снимает заряды с ленты и передает их полую шару, и они переходят на его внешнюю поверхность. Таким образом,

сфере передается постепенно большой заряд и удается достичь разности потенциалов в несколько миллионов вольт. Электростатические генераторы применяются в высоковольтных ускорителях заряженных частиц, а также в слаботочной высоковольтной технике.

**Многokратно передавая заряд полному проводнику, можно значительно повысить его потенциал.**



*Электростатический генератор Ван-де-Граафа.*

Лента Л из шелка или прорезиненной ткани движется на двух шкивах А и В.

Электростатическая машина Э заряжает ленту через острие D.

Через острие К заряды с ленты полностью стекают на полый шар и распределяются на его внешней поверхности.



# Электростатическая индукция

бесконтактный способ  
электризации тел

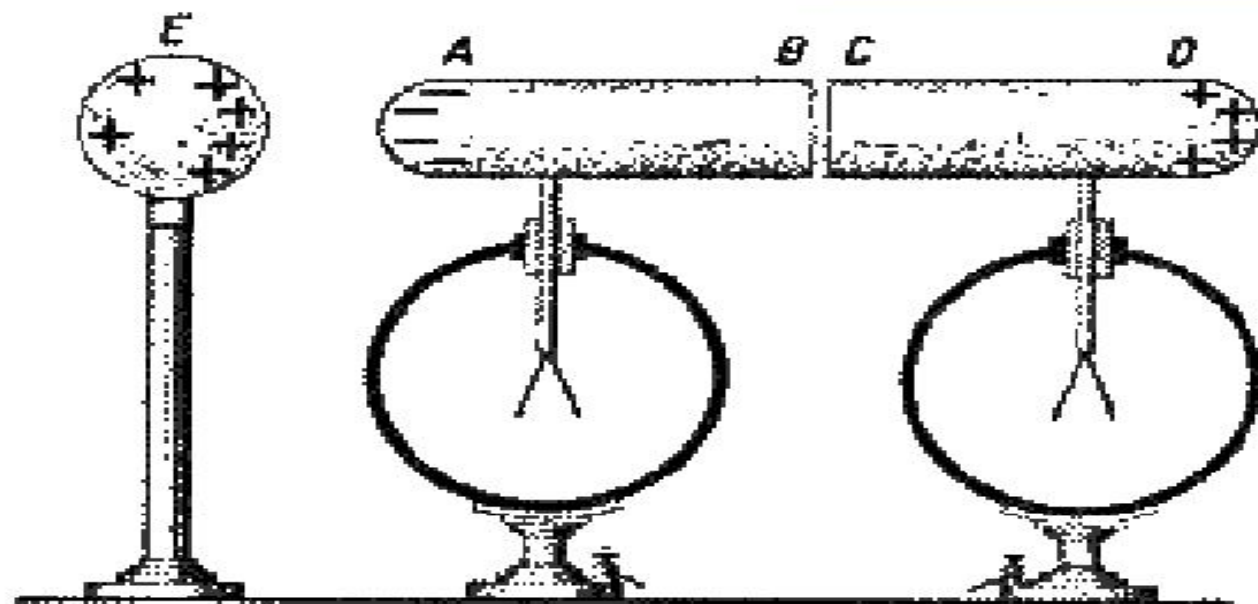
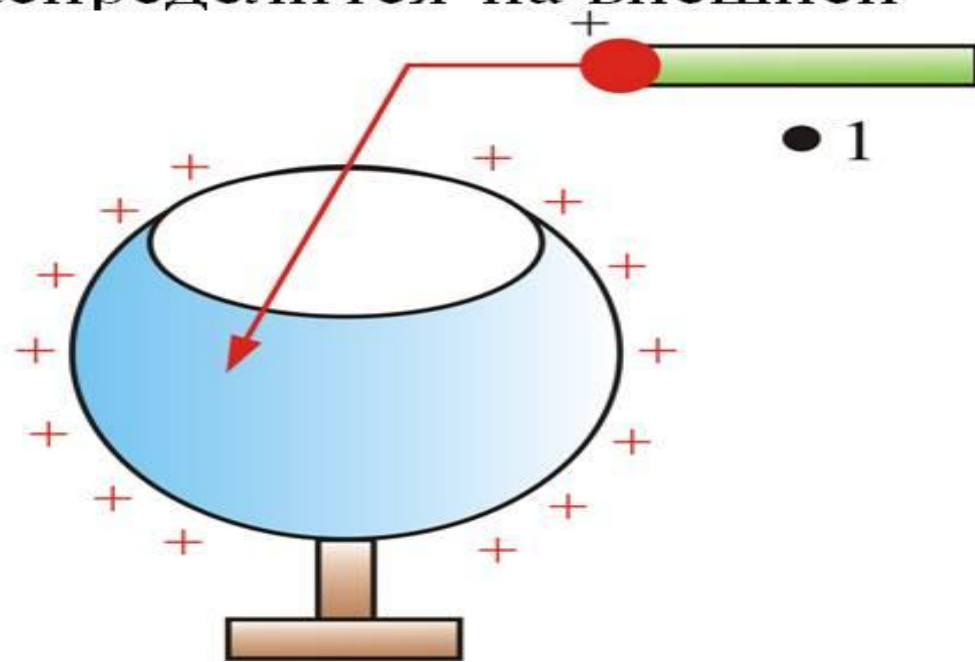


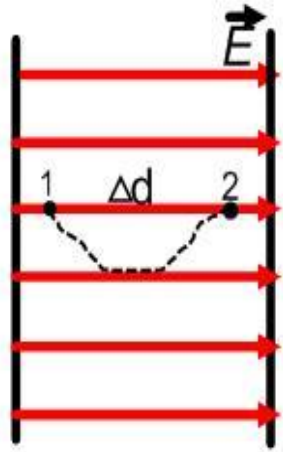
рис. 2.2

### *3. Электростатический генератор.*

Если заряженный металлический шарик привести в соприкосновение с поверхностью, какого либо, проводника, то заряд шарика частично передается проводнику: шарик будет разряжаться до тех пор, пока их потенциалы не выровняются. Иначе обстоит дело, если шарик привести в соприкосновение с внутренней поверхностью полого проводника. При этом весь заряд с шарика стечет на проводник и распределится на внешней поверхности проводника.



# Работа и энергия электрического поля



$A = Eq\Delta d$  - работа поля по перемещению заряда

$W = Eqd$  - потенциальная энергия заряда в эл. поле

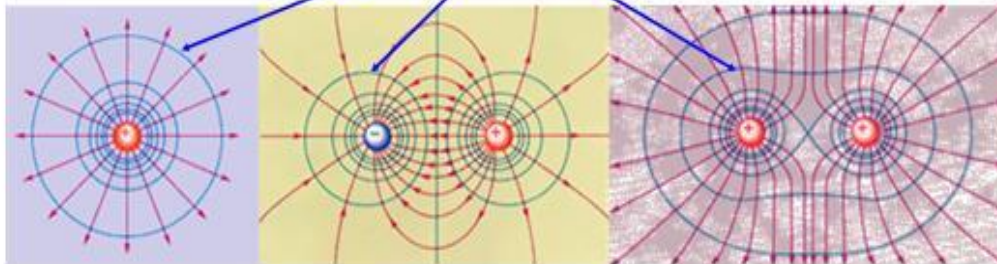
$\varphi = \frac{W}{q}$  - потенциал     $\varphi = Ed$      $\varphi = k \frac{q}{r}$

$$E = -\varphi'$$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

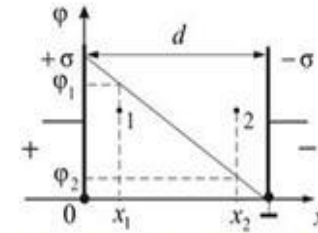
$$A = qU$$

эквипотенциальные поверхности

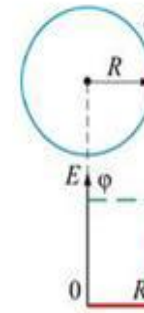


Напряженность и потенциал поля, создаваемого двумя равномерно заряженными бесконечными плоскостями:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad \varphi = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}$$



Напряженность и потенциал поля, создаваемого заряженной сферой:



$$E = \begin{cases} 0 - \text{внутри сферы} \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \text{при } r \geq R \text{ вне сферы.} \end{cases}$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} = \text{const} - \text{внутри и на} \\ \text{поверхн. сферы (} r \leq R \text{)} \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \text{вне сферы (} r > R \text{).} \end{cases}$$