Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Микро- и макрополя

Заряды (+ –)

- ***связанные*** – входят в состав атомов (молекул),

под действием эл. поля они могут смещаться из положения равновесия, но не могут покинуть молекулу (атом);

- ***сторонние*** или ***свободные***

- не входят в состав атомов (молекул), но находятся в пределах диэлектрика,

- заряды вне диэлектрика

Микро- и макрополя

Микроскопическое или ***истинное*** поле – суперпозиция (результат) поля сторонних зарядов ($\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{стор}}$) и поля связанных зарядов ($\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{связ}}$):

$$\vec{E}_{микро} = \vec{E}_{стор} + \vec{E}_{связ}$$

$$\vec{E}_{макро} = \left\langle \vec{E}_{микро} \right\rangle = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

Проводники и диэлектрики

- ***Проводники*** – это вещества, в которых свободные заряды перемещаются под действием электрического поля.
- ***Металлы*** (свободные заряды: электроны) – проводники ***первого рода***
- ***Электролиты*** и ***ионизированный газ*** (свободные заряды: положительные и отрицательные ионы) – проводники ***второго рода,*** в них при протекании тока есть перенос вещества.

Проводники и диэлектрики

- ***Диэлектрики (изоляторы)*** – это вещества, не способные проводить электрический ток.

Удельное сопротивление диэлектриков в $10^{15} \div 10^{20}$ раз больше, чем у проводников.

Проводники и диэлектрики

Все положительные заряды молекул (атомов) можно заменить одним суммарным зарядом + q, помещенным в некоторую точку, называемую ***центром тяжести положительных зарядов,***

её радиус-вектор:

$$\vec{r}_{+} = \frac{\sum q_{i+}\vec{r}_{i+}}{q_{+}}$$

Центр тяжести отрицательных зарядов

$$\vec{r}_{-} = \frac{\sum q_{i-}\vec{r}_{i-}}{q_{-}}$$

Проводники и диэлектрики

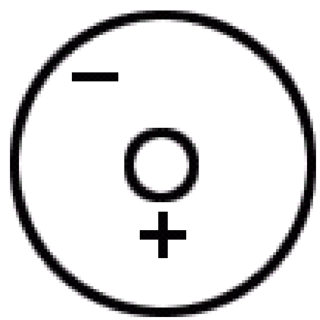
- Молекулу в первом приближении можно рассматривать как диполь (дипольный момент $\vec{p} = |q|\vec{l}$)
- Диэлектрики в зависимости от строения их молекул и внутренней структуры можно разделить на

1) ***Неполярные диэлектрики***
2) ***Полярные диэлектрики***
3) ***Ионные диэлектрики***

Проводники и диэлектрики

1) ***Неполярные диэлектрики*** (H_2, N_2, O_2, CO_2…) – молекула имеет симметричное строение

$$E_0 = 0$$

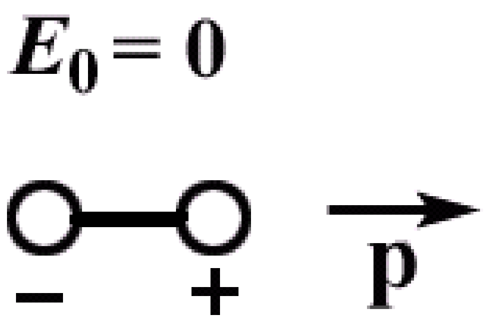


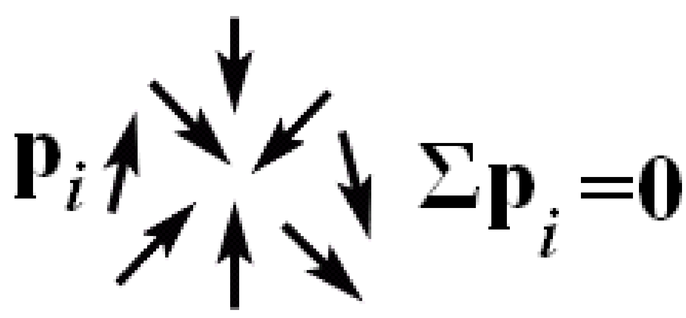
$$\vec{p} = 0$$

Проводники и диэлектрики

2) ***Полярные диэлектрики*** (H_2O, NH_3, SO_2, CO …) – молекула имеет не симметричное строение, то есть центры тяжести **+** и **-** зарядов в отсутствии внешнего электрического поля не совпадают, следовательно, молекула обладает дипольным моментом.

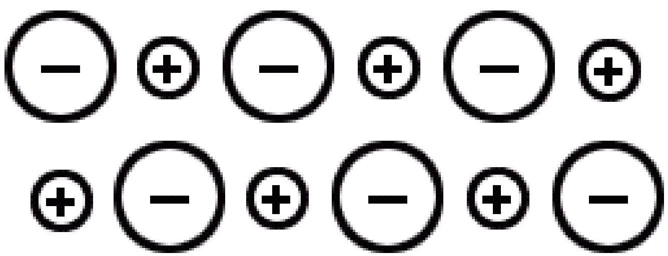
При отсутствии внешнего электрического поля $\sum p_i = 0$

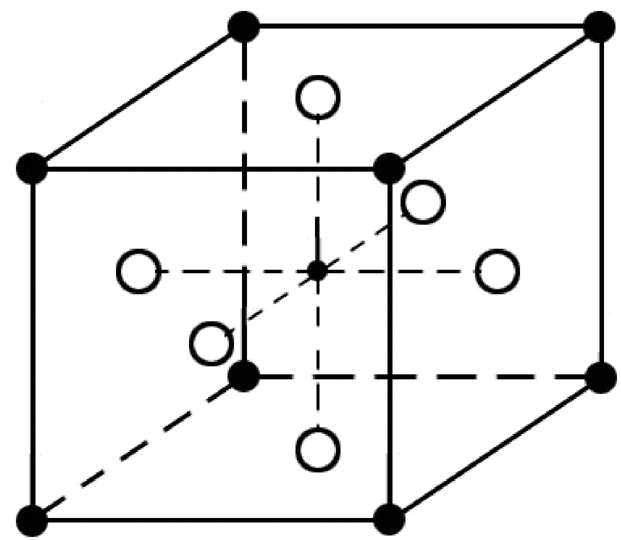




Проводники и диэлектрики

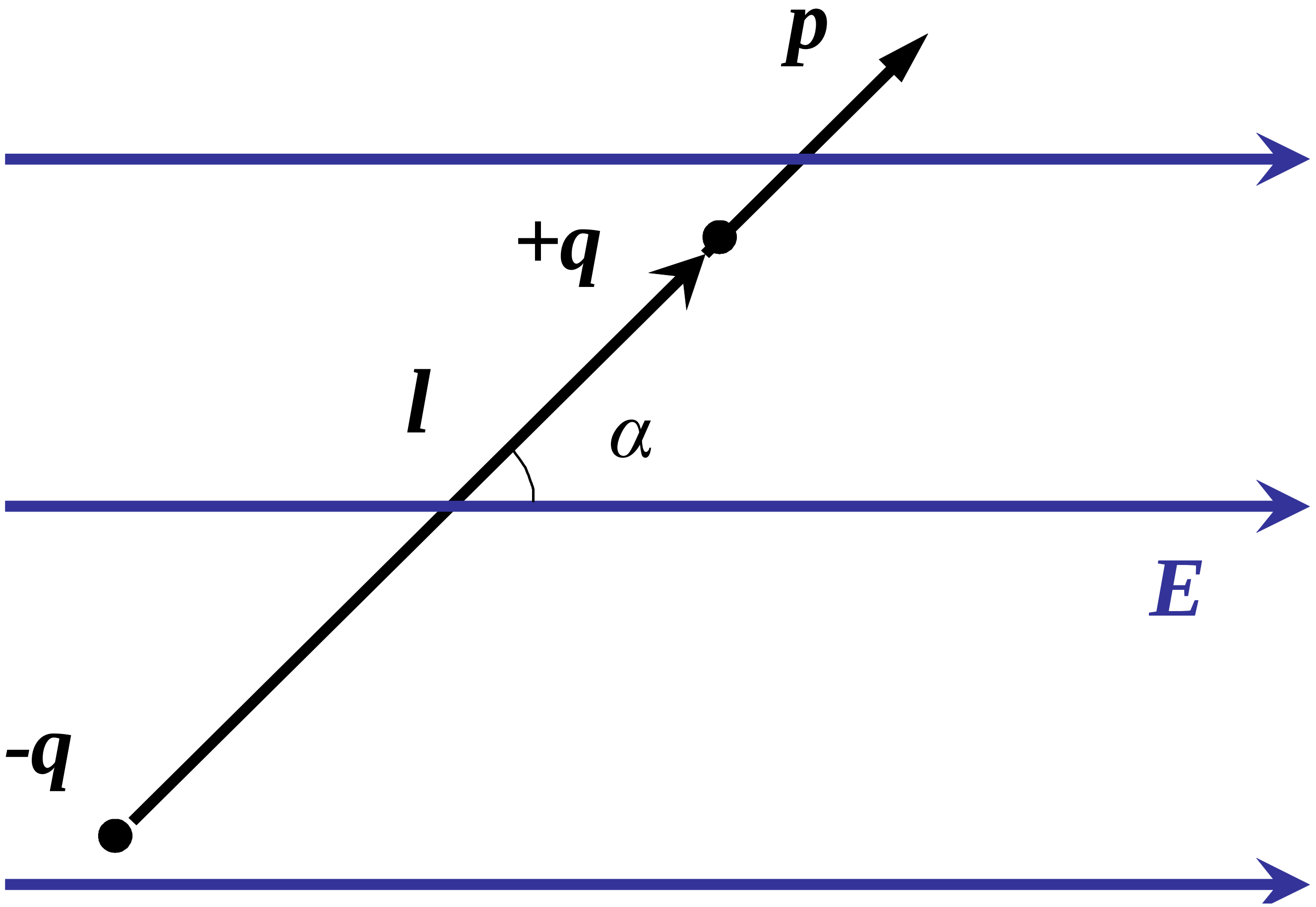
3) ***Ионные диэлектрики*** (NaCl, KCl, KBr) – молекулы имеют ионное строение, а диэлектрик представляет собой ионную кристаллическую решетку с чередованием ионов разных знаков.





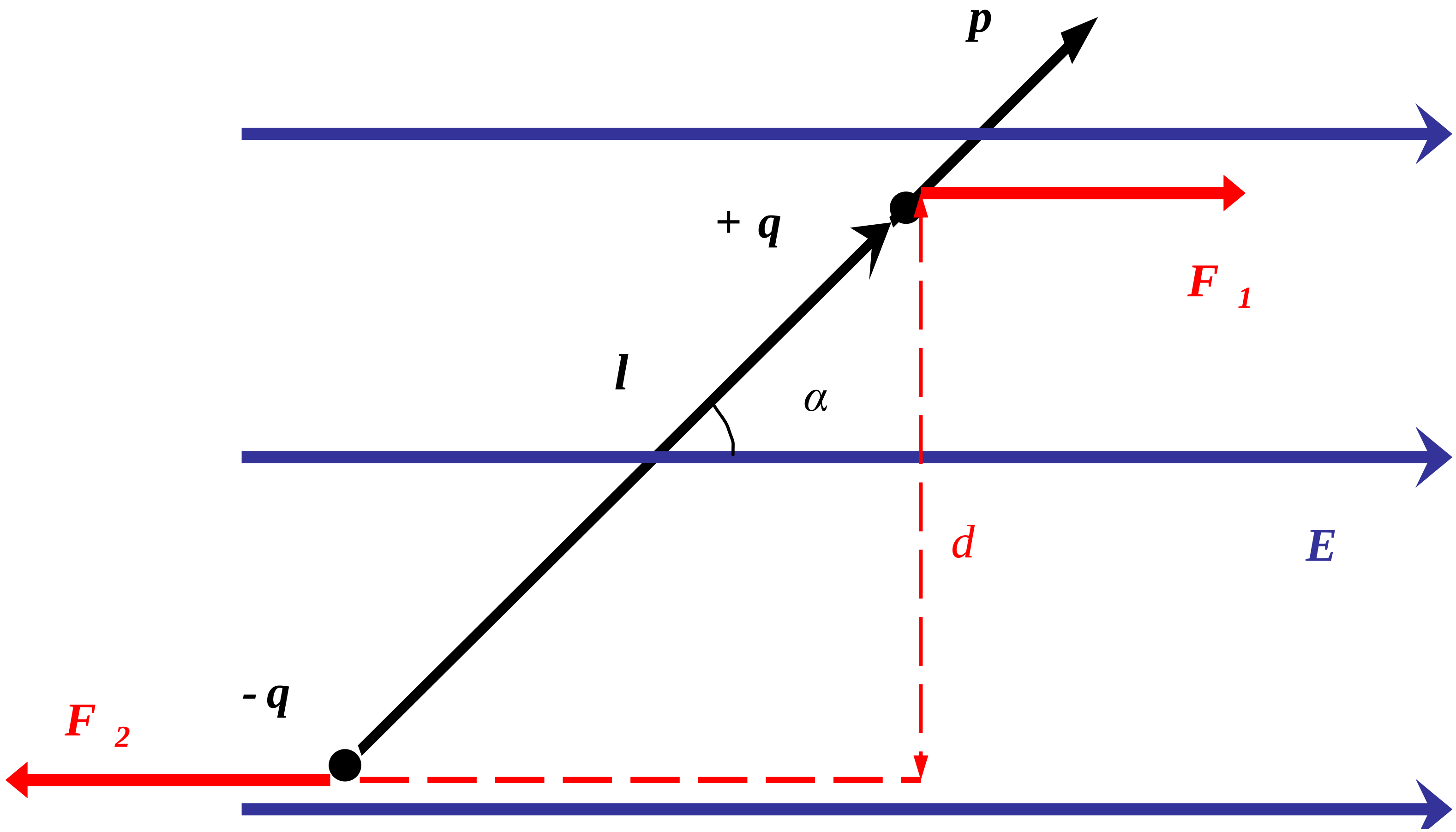
Диполь в электрическом поле

- Диполь находится в **однородном** электрическом поле ($\boldsymbol{E} = const$).

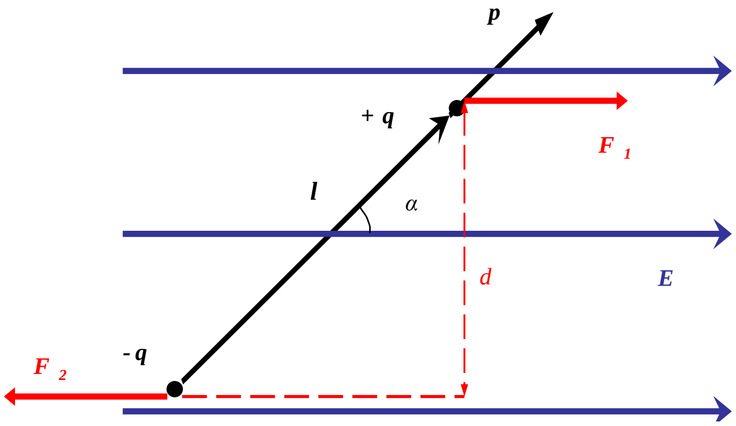


Диполь в электрическом поле

- Диполь находится в **однородном** электрическом поле ($\boldsymbol{E} = const$).



Диполь в электрическом поле



Вращающий момент

$$M = Fd$$

$$M = Fl\sin\alpha$$

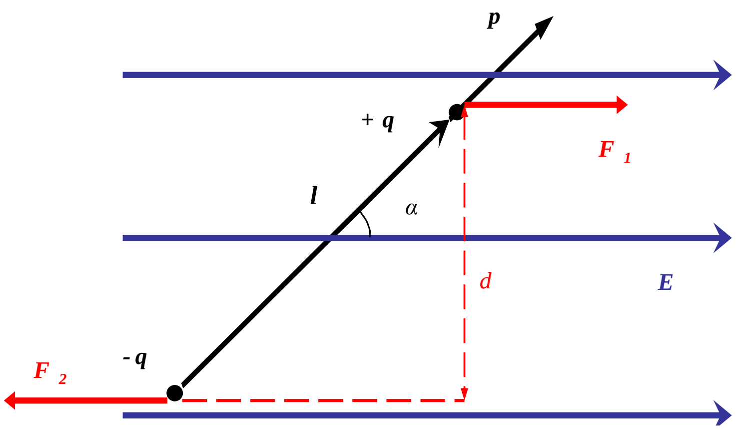
$$M = qEl\sin\alpha = qlE\sin\alpha,$$

$$\vec{p}_l = q\vec{l}.$$

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_l, \vec{E}\right]$$

Вращающий момент ***M*** стремится повернуть диполь и установить его так, чтобы $\vec{p}_l \uparrow\uparrow \vec{E}$

Диполь в электрическом поле



Работа против сил, действующих на диполь

$$dA = Md\alpha = pE\sin\alpha d\alpha$$

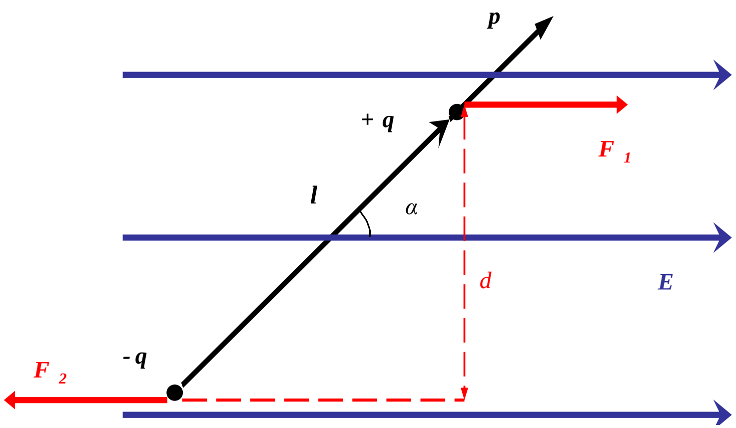
Работа идет на увеличение потенциальной энергии W, которой обладает диполь в электрическом поле:

$$dW = pE\sin\alpha d\alpha$$

$$W = -pE\cos\alpha + const$$

$$W = -pE\cos\alpha = -(\vec{p}\vec{E})$$

Диполь в электрическом поле



- Поле **неоднородное** (***E*** $\neq$ *const*), то помимо вращающего момента на диполь действует сила

$$F = F_2 - F_1 = q(E_2 - E_1) = q\frac{\partial E}{\partial l}l = p_l\frac{\partial E}{\partial l}$$

$$\vec{F} = p_l\frac{\partial \vec{E}}{\partial l}$$

Под действием этой силы диполь стремится переместиться в область наибольшей напряженности ***E*** электрического поля.

$$\vec{F} = \overline{grad}(\vec{p}_l \cdot \vec{E})$$

Поляризация диэлектриков

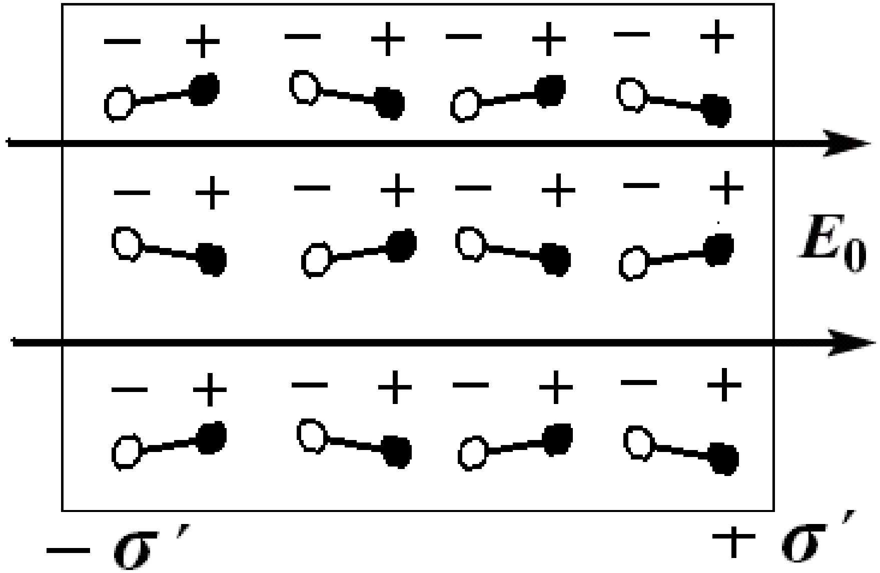
Поляризация диэлектриков – процесс ориентации диполей или появления под действием внешнего электрического поля $\boldsymbol{E}_0$ ориентированных по полю диполей.

В зависимости от типа диэлектриков будет различаться вид поляризации.

Поляризация диэлектриков

полярные диэлектрики

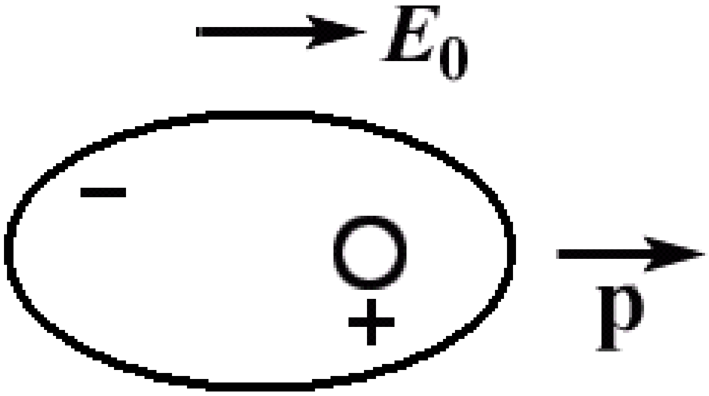
ориентационная (дипольная) поляризация

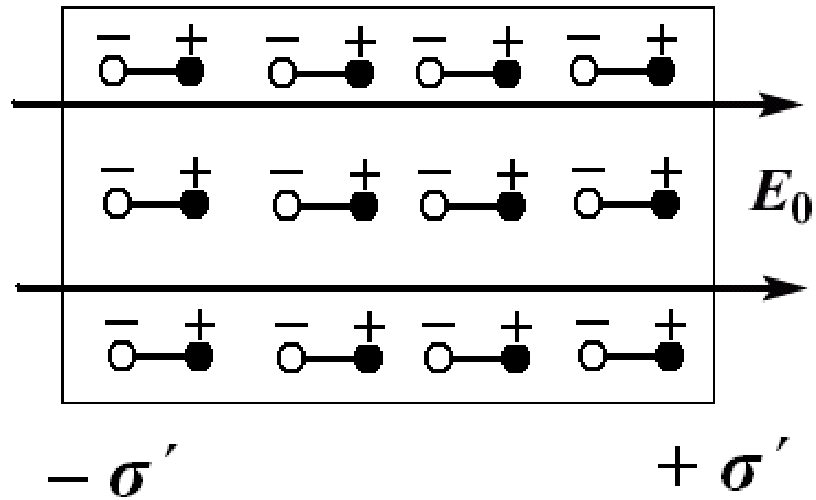


Поляризация диэлектриков

Неполярные диэлектрики

электронная (деформационная) поляризация





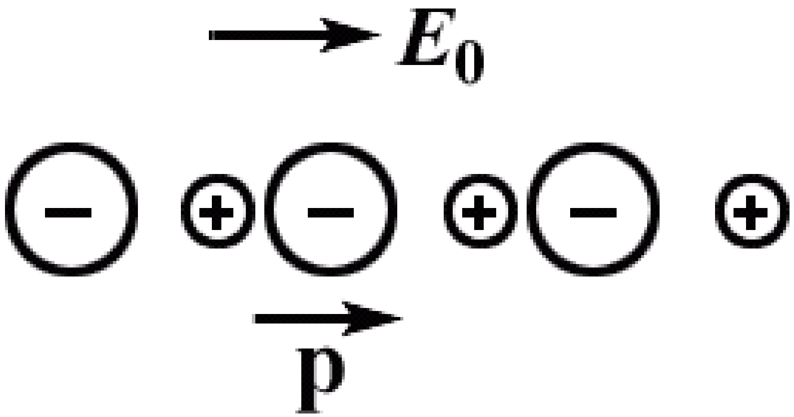
$$\vec{p} = \alpha \varepsilon_0 \vec{E},$$

$\alpha -$ поляризуемость молекулы

Поляризация диэлектриков

ионные диэлектрики

ионная поляризация



Поляризованность (вектор поляризации)

- Дипольный момент диэлектрика

$$\vec{p}_V = \sum_i \vec{p}_{li}$$

$p_{l\,i}$ – дипольный момент одной молекулы.

Поляризованность диэлектрика – дипольный момент единичного объема:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_{li}}{V}$$

[(Кл·м)/м^3 = Кл/м^2].

Поляризованность (вектор поляризации)

- Для изотропного диэлектрика с неполярными молекулами:

$$\vec{P} = \vec{p}_l \cdot n = \alpha\varepsilon_0 n\vec{E} = \chi\varepsilon_0\vec{E},$$

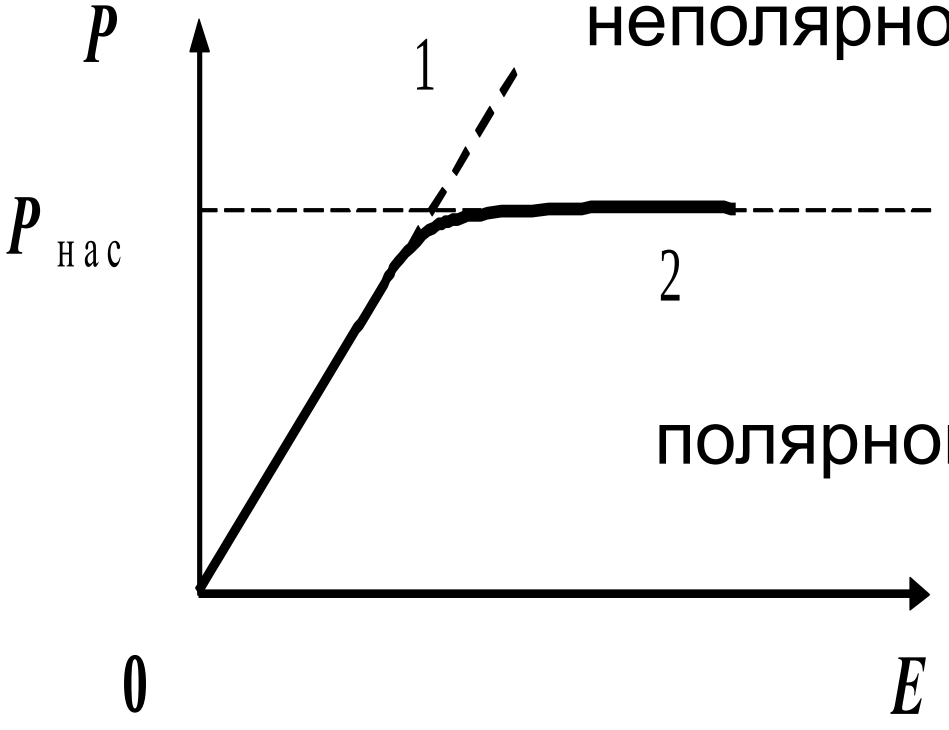
где n – концентрация молекул

$$\boxed{\chi = \alpha \cdot n}$$

диэлектрической восприимчивостью

Поляризованность(вектор поляризации)

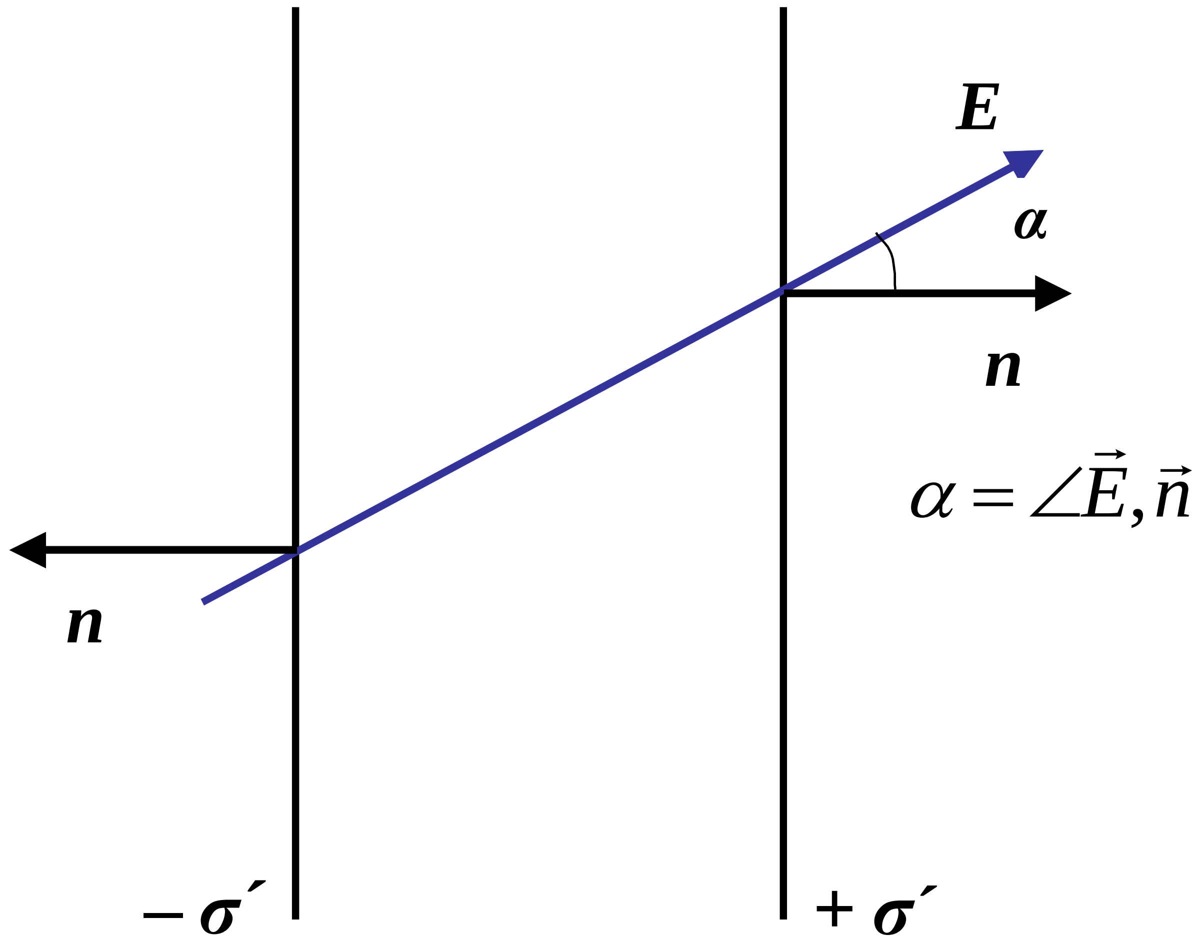
$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E},$$



неполярного диэлектрика

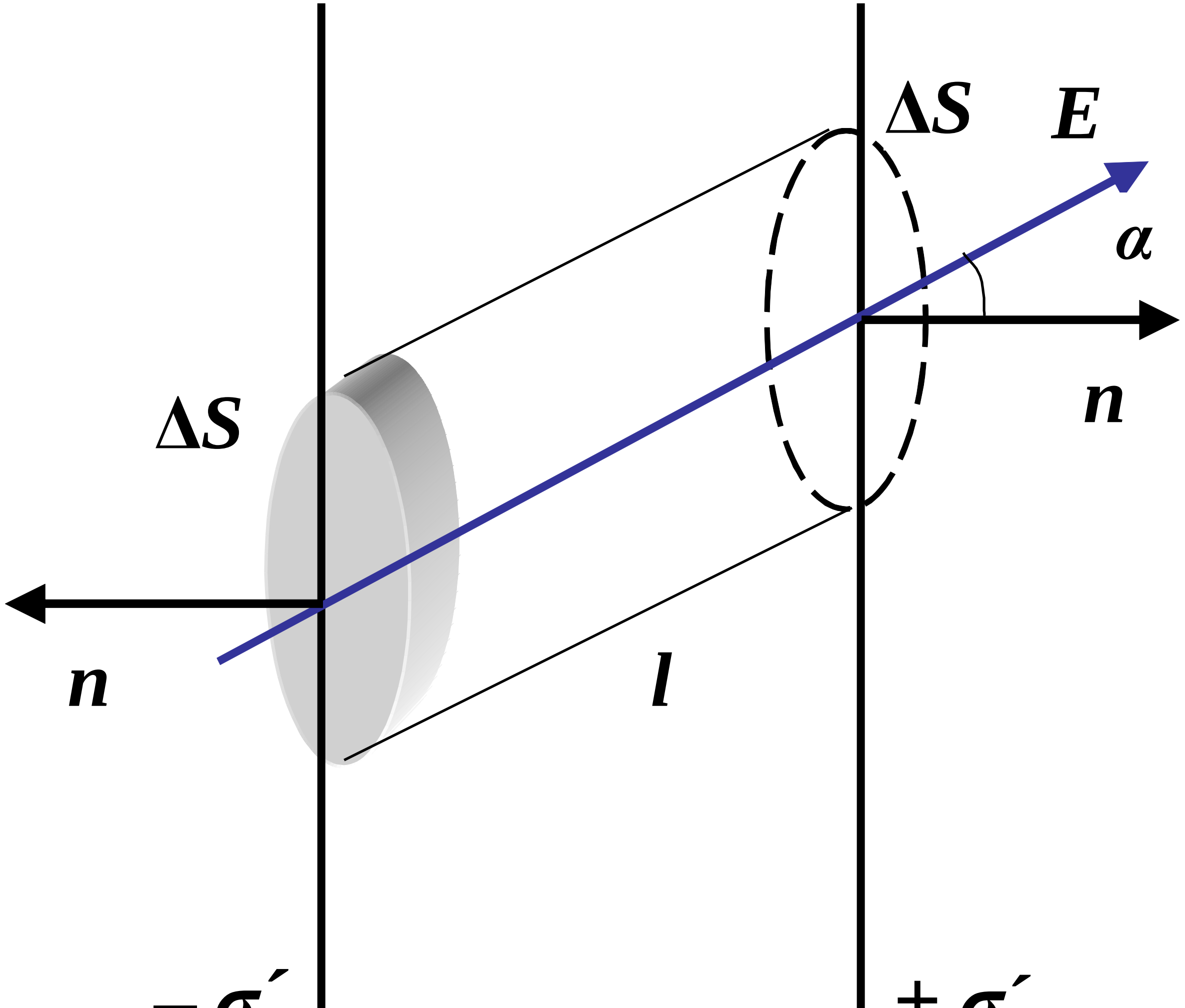
полярного диэлектрика

Связь между вектором *P* и σ’



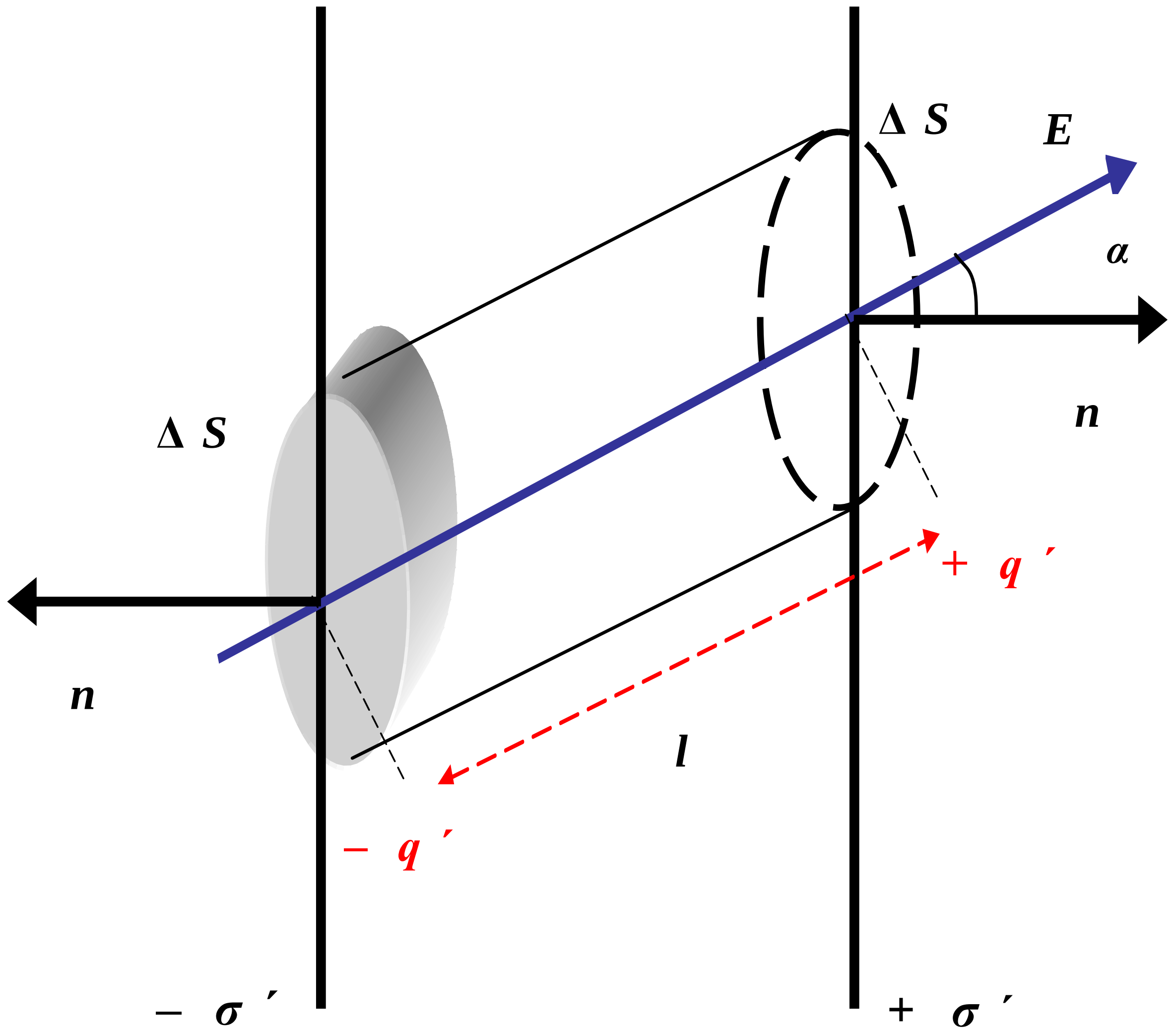
Однородная диэлектрическая пластинка

Связь между вектором *P* и *σ*



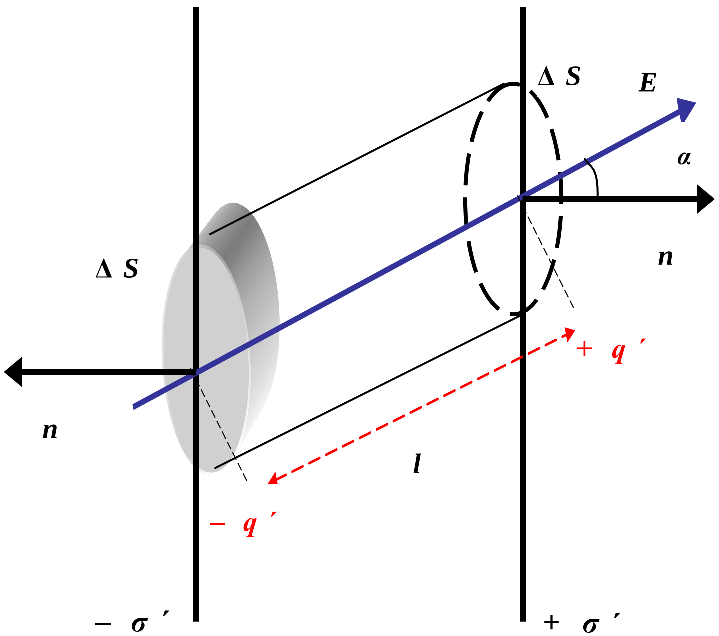
Однородная диэлектрическая пластинка

Связь между вектором *P* и *σ*



Однородная диэлектрическая пластинка

Связь между вектором *P* и *σ*



$$\Delta V = \Delta S_{\perp} \cdot l = \Delta S \cdot l \cos\alpha$$

$$p_l = q \cdot l = \sigma' \cdot \Delta S \cdot l$$

$$P = \frac{p_l}{\Delta V}$$

$$p_l = P \cdot \Delta V = P \cdot \Delta S \cdot l \cos\alpha$$

$$P \cos\alpha = \sigma' \quad \Rightarrow \quad P_n = \sigma'$$

$$\boxed{P_n = \sigma' = \chi \varepsilon_0 E}$$

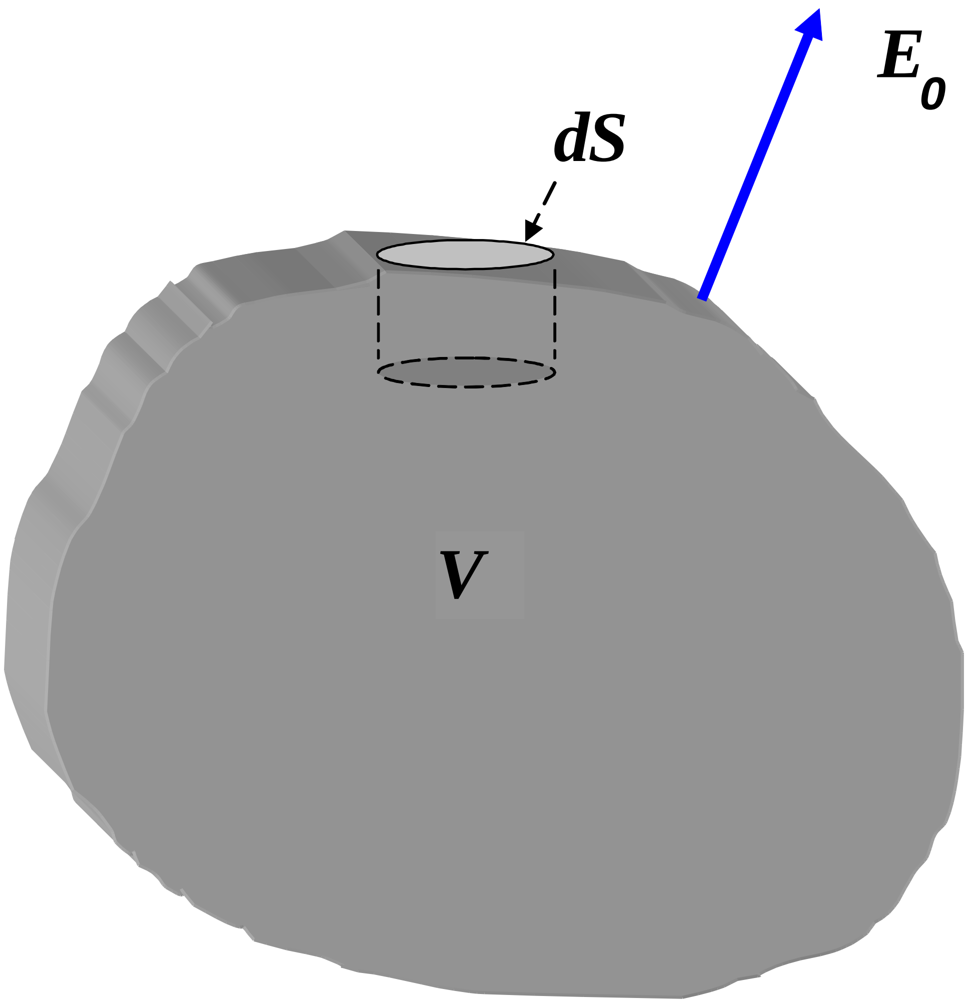
Связь между вектором *P* и *σ*

$$\boxed{P_n = \sigma' = \chi \varepsilon_0 E}$$

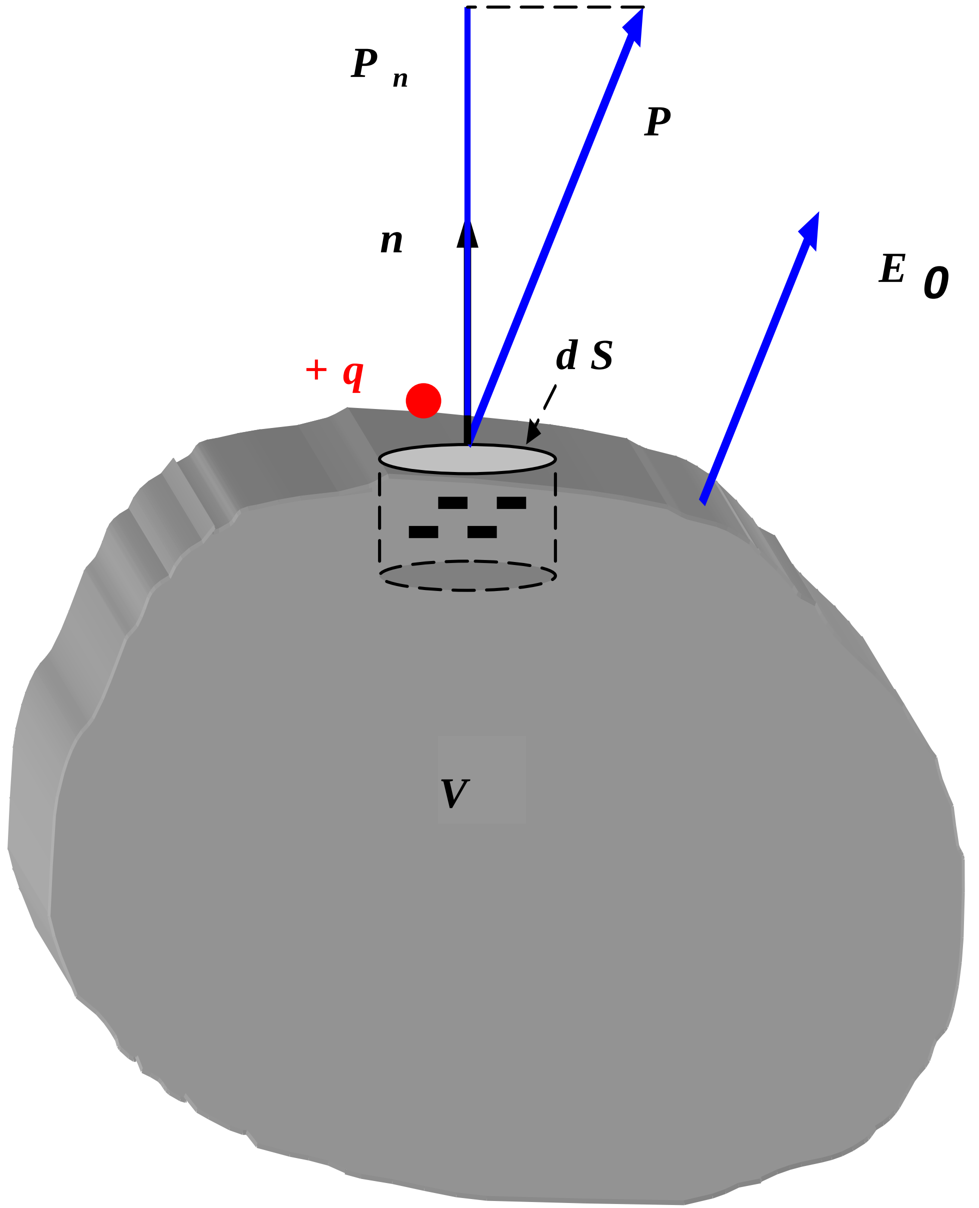
- P_n – проекция вектора поляризованности на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика.
- P_n численно равна электрическому заряду, смещаемому через единичную площадку в направлении положительной нормали к ней.

Закон Гаусса для вектора поляризации *P*

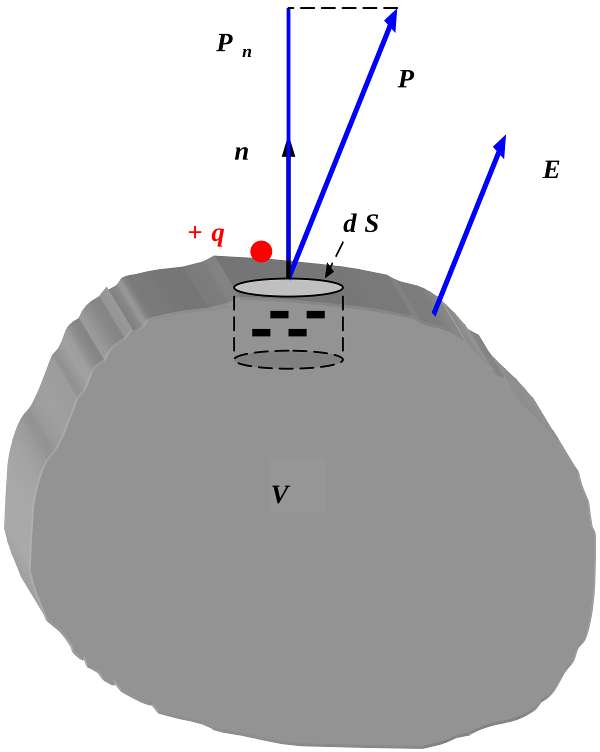
Закон Гаусса для вектора поляризации *P*



Закон Гаусса для вектора поляризации *P*



Закон Гаусса для вектора поляризации *P*

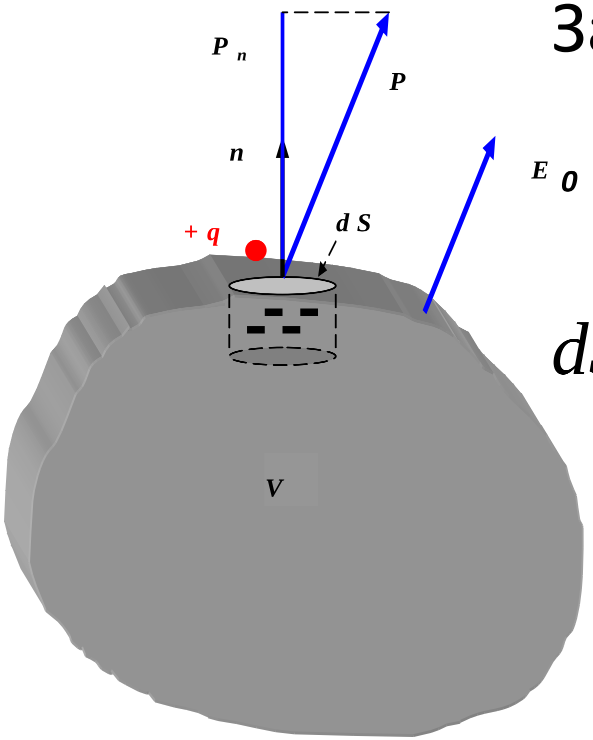


При включении поля через площадку dS в направлении вектора $\boldsymbol{E_0}$ сместятся положительные заряды, в объеме останутся отрицательные заряды.

Поверхностная плотность поляризационных зарядов

$$\sigma' = P_n$$

Закон Гаусса для вектора поляризации *P*



Заряд, прошедший через площадку *dS:*

$$dq = \sigma' \cdot dS = P_n \cdot dS = \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$dS \to 0$, в окрестностях площадки:

$$\boldsymbol{E_0} = const, \boldsymbol{P} = const.$$

Заряд, оставшийся в объеме под площадкой *dS:*

$$dq = -\vec{P} \cdot d\vec{S}$$

Закон Гаусса для вектора поляризации *P*

$$Q_{выш} = \sum q_{выш} = \oint_S dq = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

$$Q_{связ} = \sum q_{связ} = -\sum q_{выш} = -\oint_S \vec{P} d\vec{S} = -\oint_S P_n dS$$

$$-Q_{поляриз} = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

Закон Гаусса для вектора поляризации *P*

$$-Q_{поляриз} = \oint_S \vec{P} d\vec{S}$$

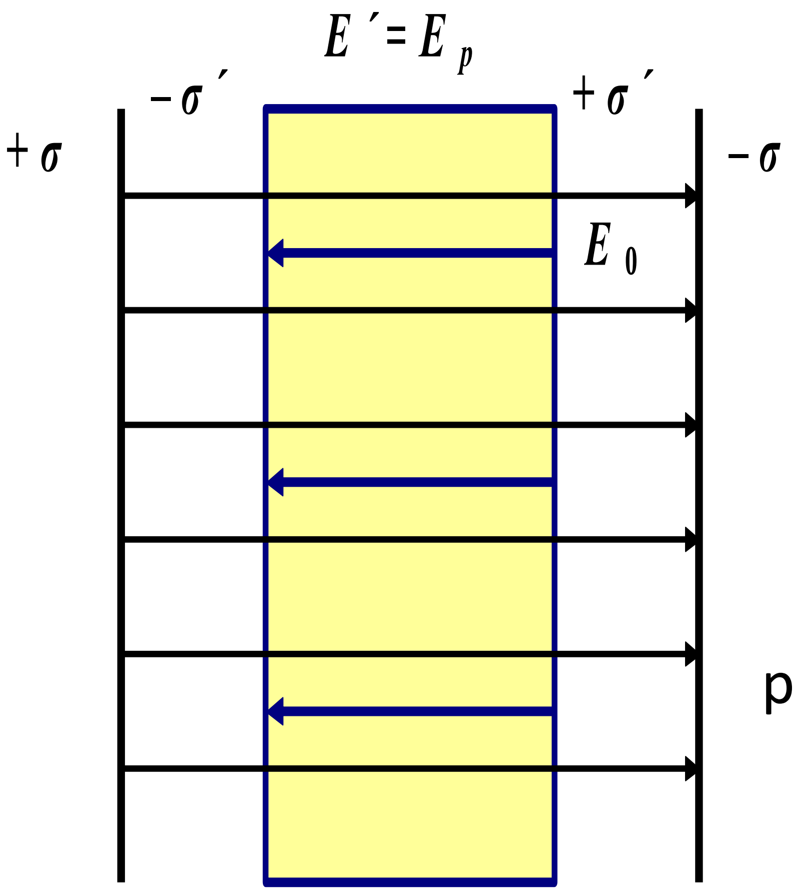
- Поток вектора поляризации ***P*** через произвольную замкнутую поверхность ***S*** равен взятому с обратным знаком поляризационному заряду диэлектрика в объеме, охватываемом этой поверхностью.

Вектор электростатической индукции.

- Поле в среде отличается от поля в вакууме тем, что оно создается как свободными, так и связанными (поляризационными) зарядами.
- Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q_{своб} + q_{пол}}{\varepsilon_0}$$

Вектор электростатической индукции.



Свободные заряды создают внешнее поляризующее поле $\boldsymbol{E}_0$, а связанные заряды – добавочное поле поляризованного диэлектрика $\boldsymbol{E}p$.

$$\vec{E}_p \uparrow\downarrow \vec{E}_0$$

результирующее поле в диэлектрике:

$$E = E_0 - E_p < E_0$$

Вектор электростатической индукции.

По теореме Гауса для векторов E и P:

$$\oint_S \varepsilon_0 \vec{E} d\vec{S} = q_{своб} + q_{пол} \qquad \oint_S \vec{P} d\vec{S} = -q_{пол}$$

$$\Rightarrow \oint_S (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) d\vec{S} = q_{своб}$$

$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}}$$

вектор ***электростатической индукции (электрического смещения)***.

Закон Гаусса для вектора электростатической индукции

$$\boxed{\oint\limits_S \vec{D}d\vec{S} = q_{своб}}$$

Поток вектора электростатической (электрической) индукции через замкнутую поверхность ***S*** равен **алгебраической сумме** свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью.

Закон Гаусса для вектора электростатической индукции

Закон Гаусса для вектора ***D*** в дифференциальном виде:

$$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = \int_V div\vec{D}dV = \int_V \rho dV$$

$$div\vec{D} = \rho$$

Связь между векторами *D* и *E*

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \qquad \vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E}$$

$\boxed{\varepsilon = 1 + \chi}$ - ***относительная диэлектрическая проницаемость*.**

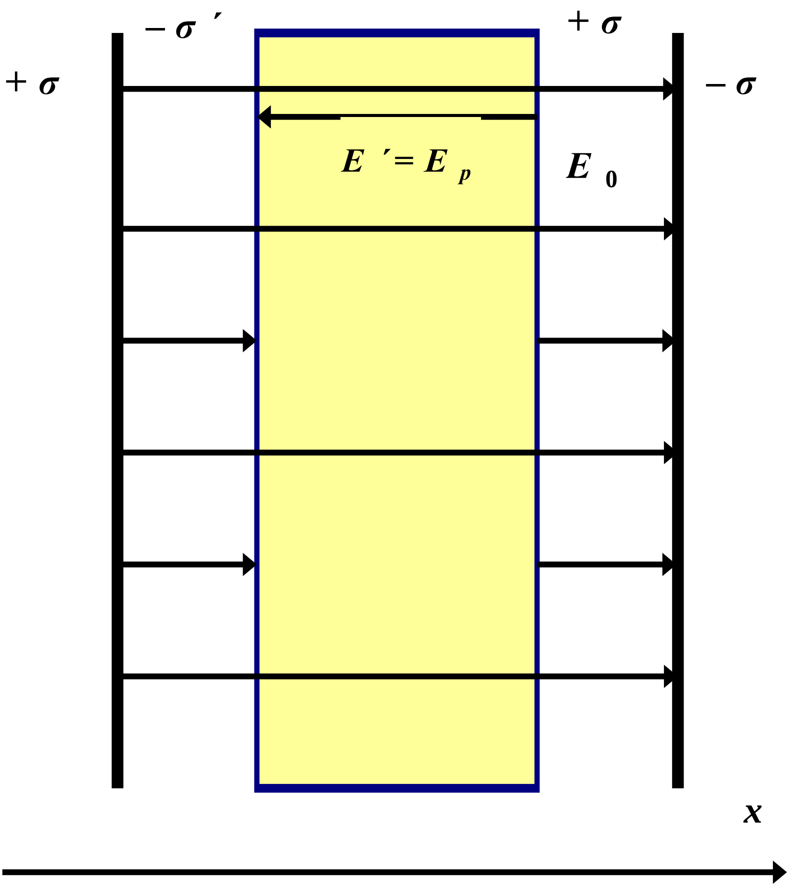
$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}}$$

Связь между векторами *D* и *E*

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

Вектор **_D_** *характеризует* установившееся **электрическое поле**, создаваемое свободными зарядами, но при таком их распределении, какое имеет место при наличии диэлектрика.

Относительная диэлектрическая проницаемость

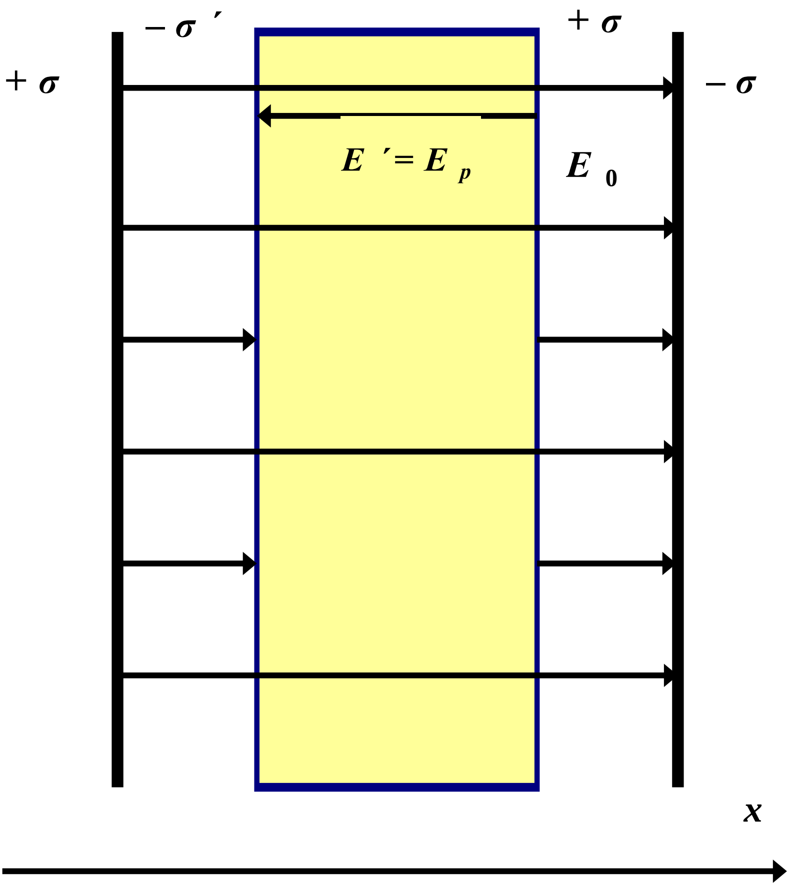


Внешнее поле E_0 создается двумя бесконечными пластинами с поверхностной плотностью заряда $+\sigma$ и $-\sigma$.

Результирующее поле в диэлектрике

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

Относительная диэлектрическая проницаемость



В проекциях на ось x:

$$E = E_0 - E'$$

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

$$E = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$P = \sigma' \qquad \vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

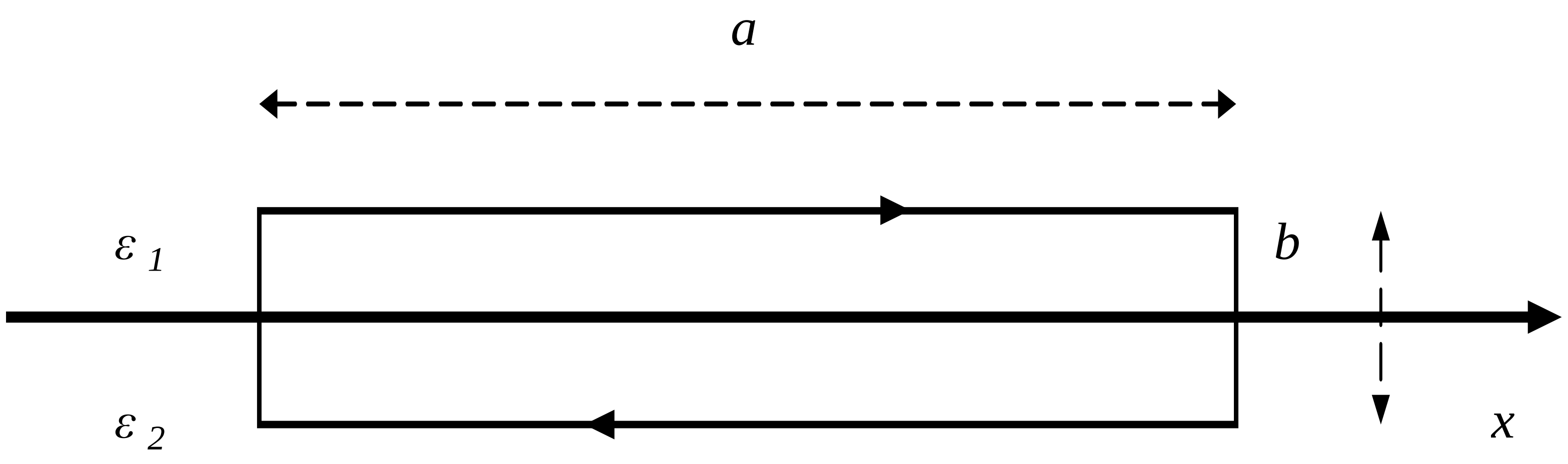
Относительная диэлектрическая проницаемость

$$E = E_0 - \frac{\chi \varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} \qquad E_0 = (1 + \chi)E \qquad \varepsilon = 1 + \chi$$

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

Относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает во сколько раз поле в вакууме $\boldsymbol{E}_0$ больше поля $\boldsymbol{E}$ в среде.

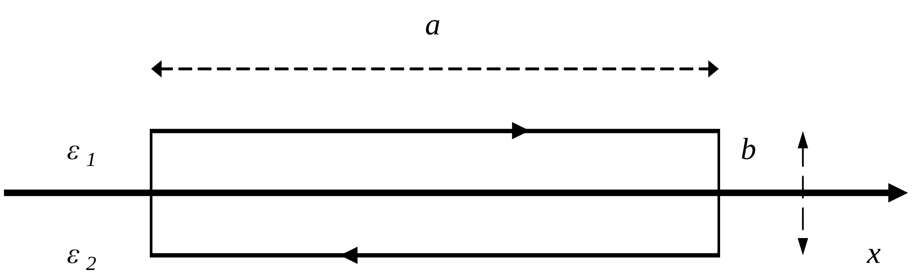
Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



Прямоугольный контур $a \times b$

Два соприкасающихся диэлектрика с различными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2, помещенные во внешнее электрическое поле.

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



Циркуляция вектора $\boldsymbol{E}$ *по замкнутому контуру*

$$\oint_l \vec{E}d\vec{l} = 0$$

$$\oint_l \vec{E}d\vec{l} = E_{1x}a - E_{2x}a + \langle E_n \rangle 2b$$

$$E_{1x} = E_{1\tau} \qquad E_{2x} = E_{2\tau}$$

тангенциальные составляющие $\boldsymbol{E}$ *в 1 и 2 диэлектрике*

$\langle E_n \rangle$ – *среднее значение* $\boldsymbol{E}$ *на участках контура перпендикулярных к границе.*

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0 = E_{1x}a - E_{2x}a + \langle E_n \rangle 2b$$

$$(E_{2\tau} - E_{1\tau}) \cdot a = \langle E_n \rangle \cdot 2b$$

Сторона *b* контура мала: $b \to 0.$

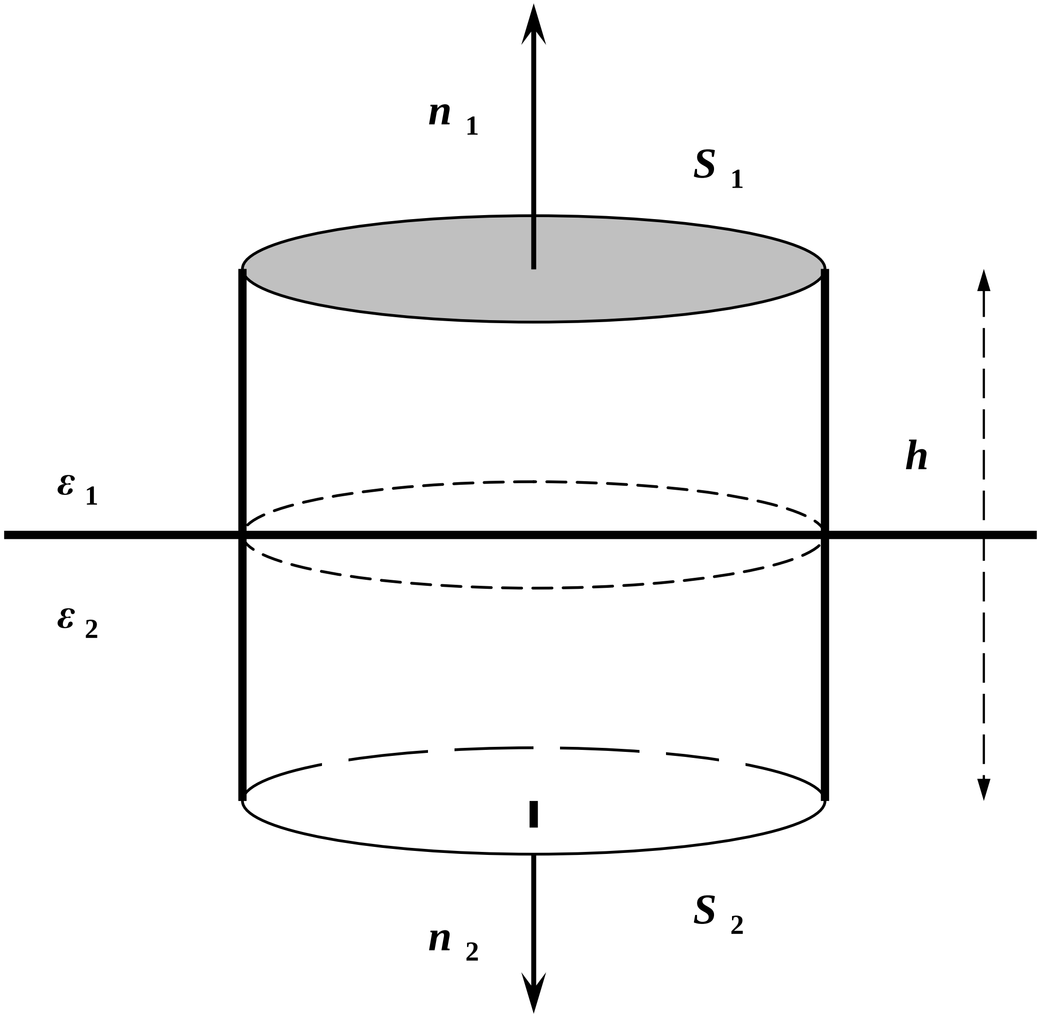
$$(E_{2\tau} - E_{1\tau}) \cdot a = 0$$

$$\boxed{E_{1\tau} = E_{2\tau}}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\boxed{\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$$

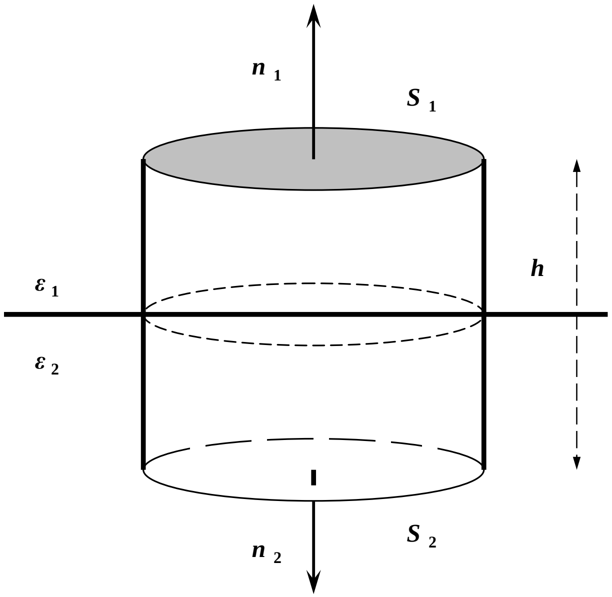
Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



Возьмем на границе цилиндрическую поверхность высотой $\boldsymbol{h}$.

Основание $\boldsymbol{S_1}$ расположено в первом диэлектрике, $\boldsymbol{S_2}$ – во втором диэлектрике.

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



$$S_1 = S_2 = S \to 0.$$

Поле в пределах $\boldsymbol{S}$ - однородное.

Сторонних зарядов на границе 2-х диэлектриков нет.

$$\Phi_D = \sum q_i = 0$$

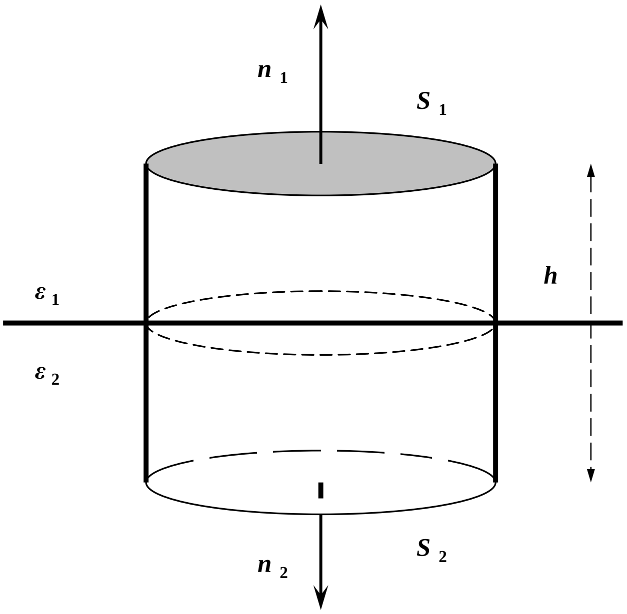
$$\Phi_D = D_{1n} S_{осн} + D_{2n} S_{осн} + \langle D_\tau \rangle S_{бок} = 0$$

D_{1n} – проекция вектора $\boldsymbol{D}$ в первом диэлектрике на нормаль $\boldsymbol{n_1}$,

D_{2n} – проекция вектора $\boldsymbol{D}$ во втором диэлектрике на нормаль $\boldsymbol{n_2}$,

$\langle D_\tau \rangle$ – значение $\boldsymbol{D}$, усредненное по всей боковой поверхности.

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



$$\Phi_D = D_{1n}S + D_{2n}S + \langle D_\tau \rangle S_{бок} = 0$$

h мала ($\boldsymbol{h} \to 0$) $\qquad S_{бок} \to 0.$

$$D_{1n} = -D_{2n}$$

Если рассмотреть проекции векторов $\boldsymbol{D_1}$ и $\boldsymbol{D_2}$ на одну и ту же нормаль

$$\boxed{D_{1n} = D_{2n}}$$

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$E_{1\tau} = E_{2\tau} \qquad\qquad D_{1n} = D_{2n}$$

$$\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \qquad\qquad \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

При переходе через границу раздела двух сред

$\boldsymbol{D_n}$ и $\boldsymbol{E_\tau}$ изменяются непрерывно

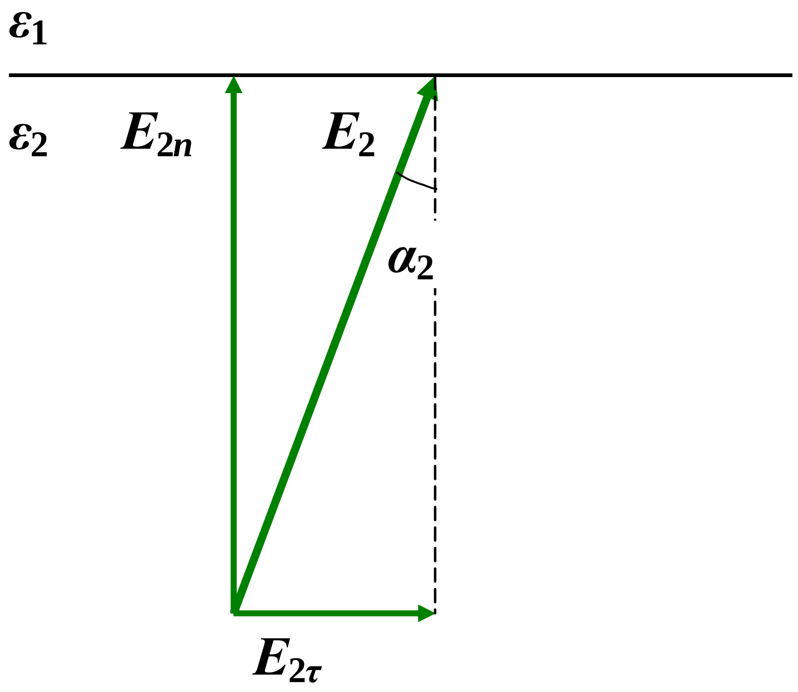
(не претерпевают скачка)

$\boldsymbol{D_\tau}$ и $\boldsymbol{E_n}$ претерпевают разрыв

Следствием этого является то, что линии напряженности электрического поля $\boldsymbol{E}$ и линии смещения $\boldsymbol{D}$ на границе двух диэлектриков претерпевают излом.

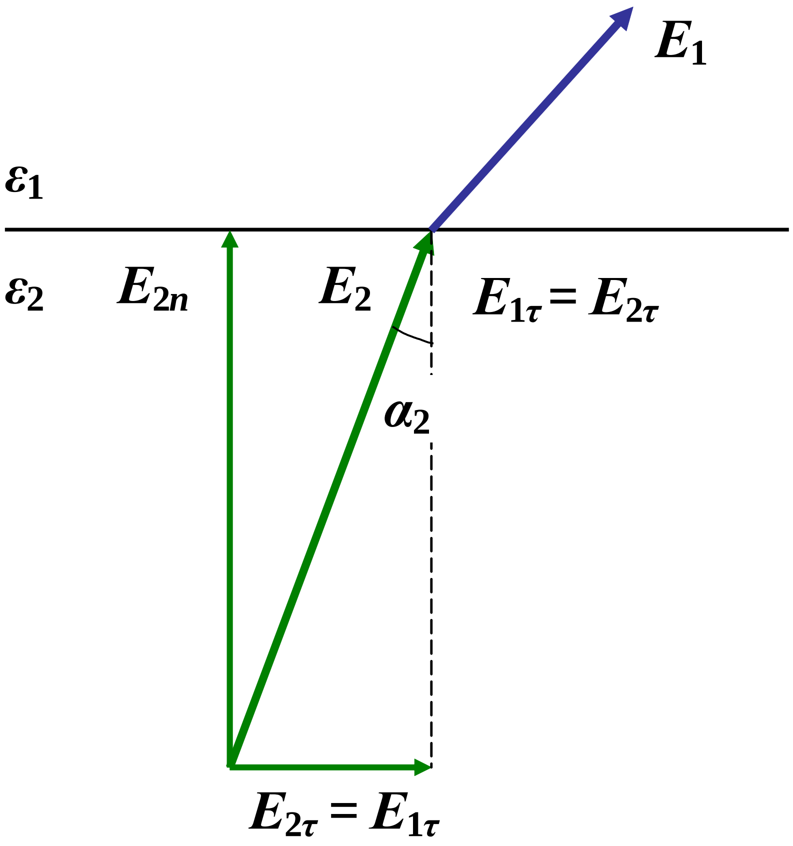
Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



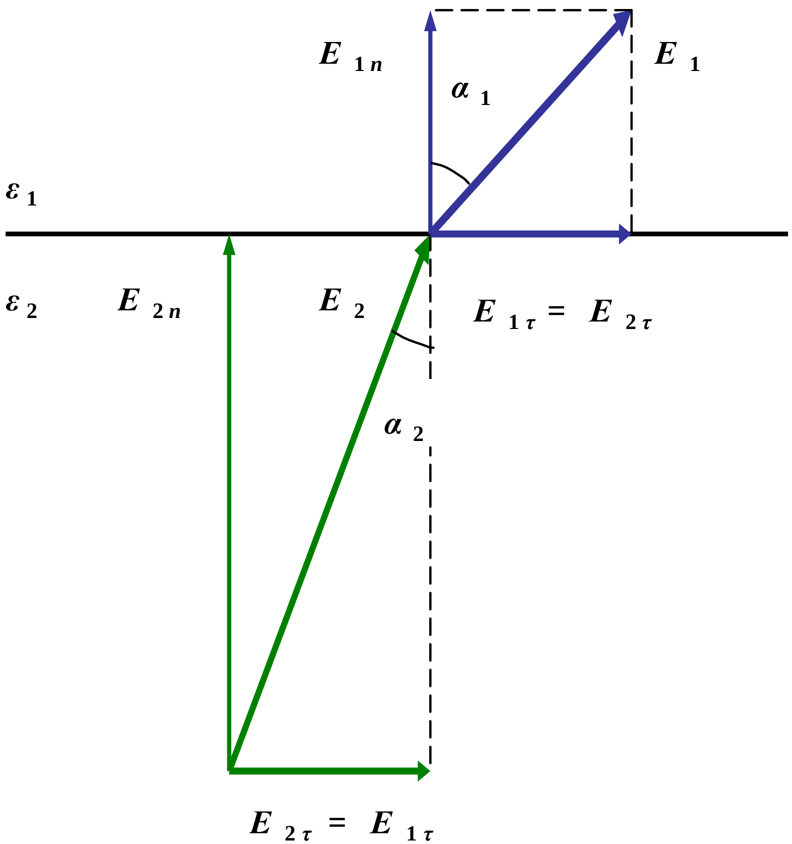
Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$



Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

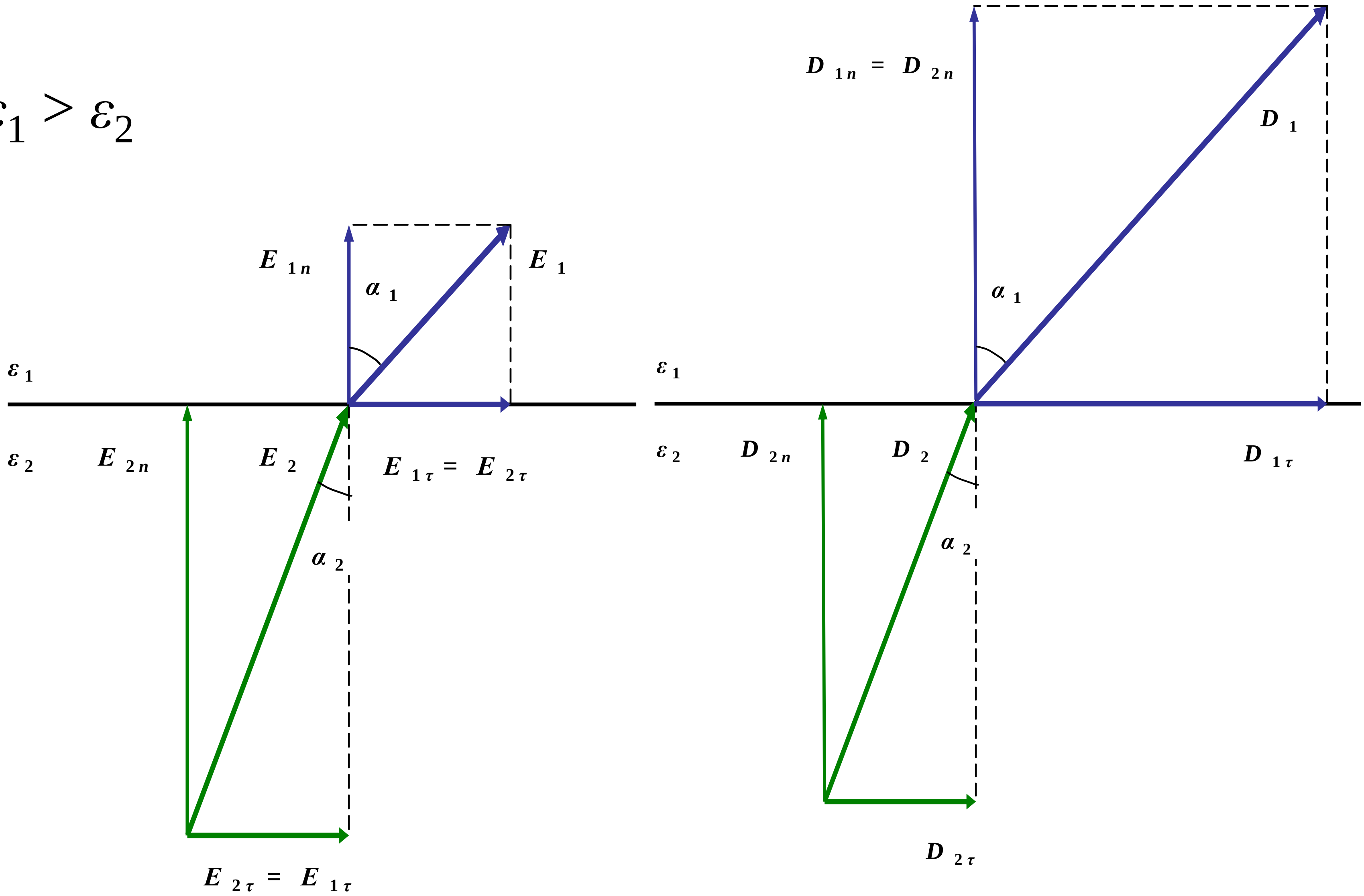
$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



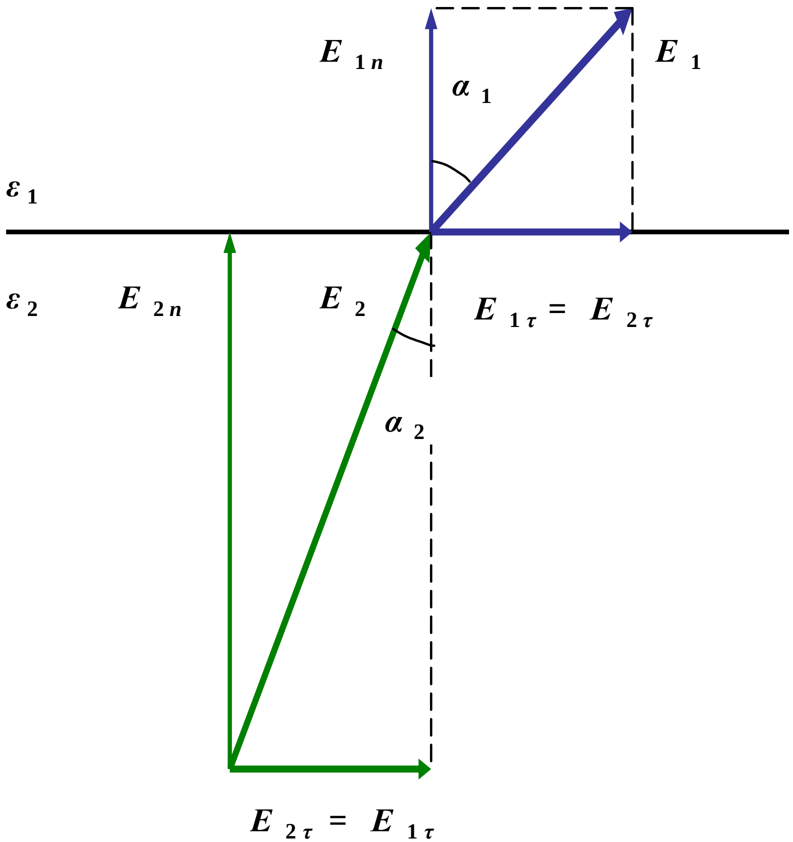
При переходе в диэлектрик с большим ε линии $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{D}$ удаляются от нормали

Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$$



Условия на границе раздела двух диэлектрических сред



$$E_{1\tau} = E_{2\tau}$$

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$$

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

$$\frac{tg\,\alpha_1}{tg\,\alpha_2} = \frac{\dfrac{E_{1\tau}}{E_{1n}}}{\dfrac{E_{2\tau}}{E_{2n}}} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

Сегнетоэлектрики

- Существует группа веществ, которые обладают спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля.

Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$

Сегнетоэлектрики

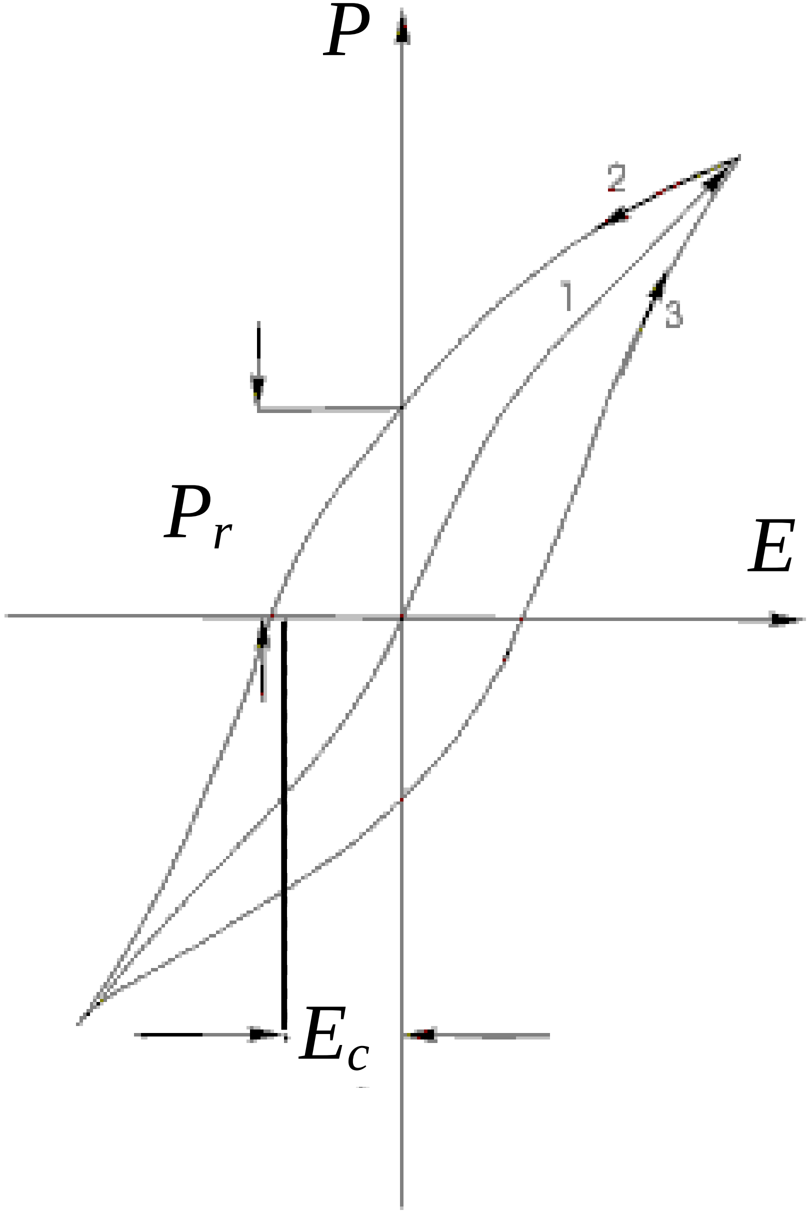
Характерные особенности:

1. для сегнетовой соли ε=10000
2. Зависимость $D=f(E)$ не является линейной
3. При изменении поля значения вектора поляризации P отстают от напряженности поля E, в результате чего P определяется не только величиной E в данный момент, но и предшествующим значениями E.

Это явление называется **гистерезисом**.

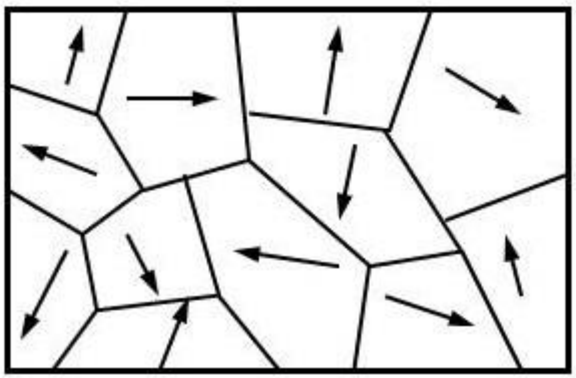
Сегнетоэлектрики

$P=f(E)$



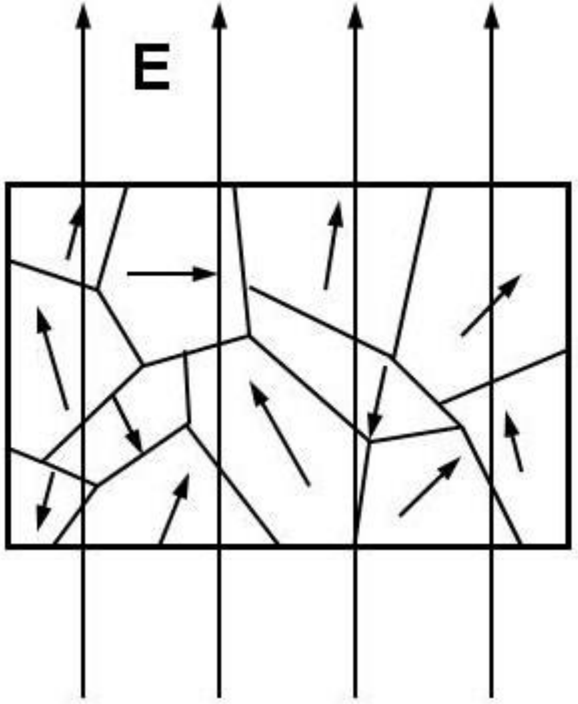
Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектрики – кристаллические вещества, в которых есть области *спонтанной поляризации* (**домены**), созданные силами хим. связей в кристалле.



Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектрики – кристаллические вещества, в которых есть области *спонтанной поляризации* (**домены**), созданные силами хим. связей в кристалле.



Под действием внешнего электрического поля моменты доменов поворачиваются как целое, устанавливаясь в направлении поля.

Для каждого сегнетоэлектрика есть температура (*точка Кюри*), выше которой вещество утрачивает свои «особые» свойства.

Пьезоэлектрики

Прямой и обратный пьезоэлектрический эффекты

Самостоятельно!

Проводники в электрическом поле

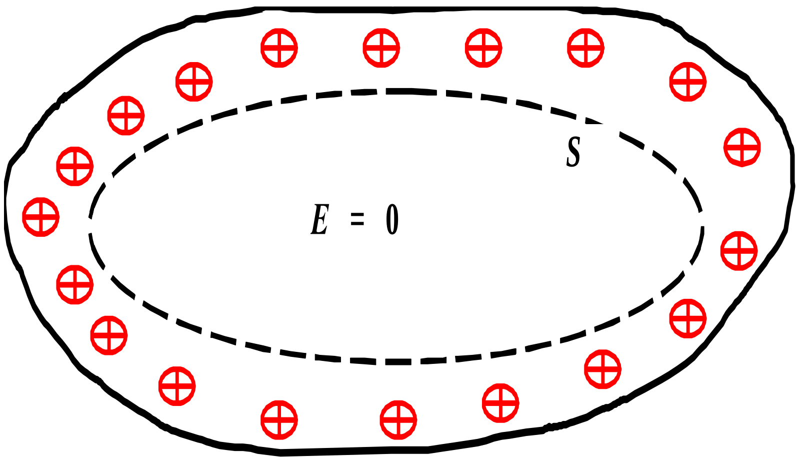
Проводники

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – ***носители заряда***, которые способны под действием внешнего электрического поля перемещаться по всему объему проводника.

Носителями зарядов в твердых металлических проводниках являются электроны, которые называются ***электронами проводимости*** или ***свободными электронами***.

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд + *q*

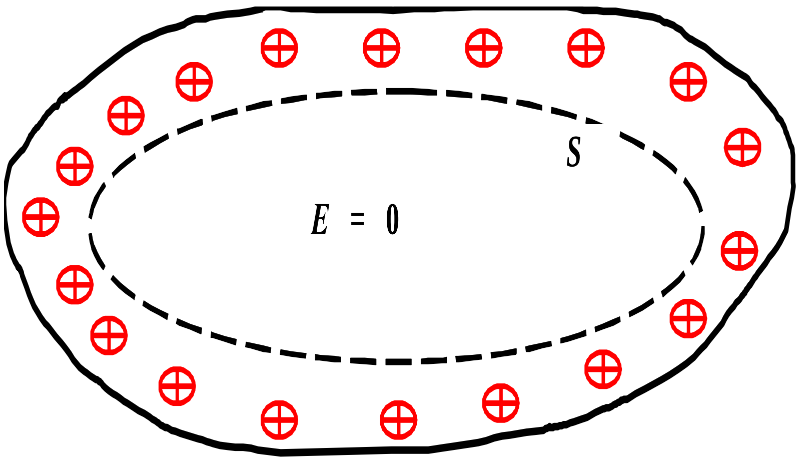


$$\vec{E} = 0$$

Если бы между любыми произвольно выбранными двумя точками проводника существовало поле, то возник бы и **электрический ток** без источника, что противоречит закону сохранения энергии.

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд + ***q***



$$\vec{E} = 0$$

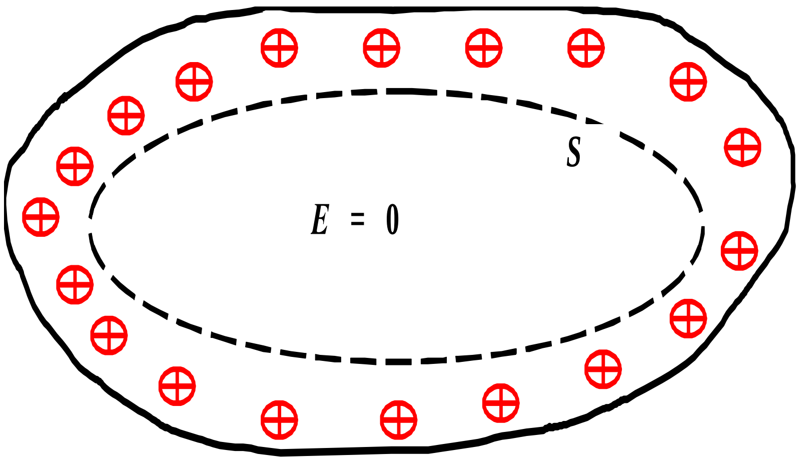
$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \int_V \frac{\rho dV}{\varepsilon_0} = \frac{\sum q}{\varepsilon_0}$$

S – произвольная замкнутая поверхность внутри проводника

$$\vec{E} = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho = 0$$

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд + *q*



$$\rho = 0$$

В объеме проводника избыточные **заряды** отсутствуют и могут находиться только **на внешней поверхности проводника**.

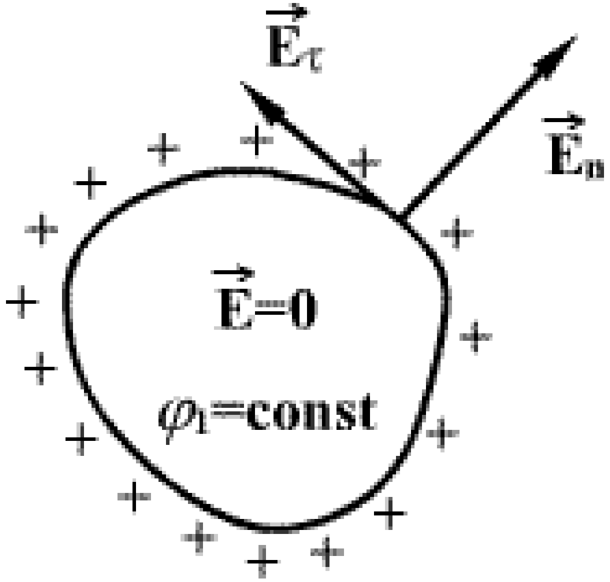
$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$$

$$\vec{E} = 0$$

$$\varphi = const$$

Любой **проводник** представляет собой **эквипотенциальное тело**, а его поверхность, естественно, является *эквипотенциальной*.

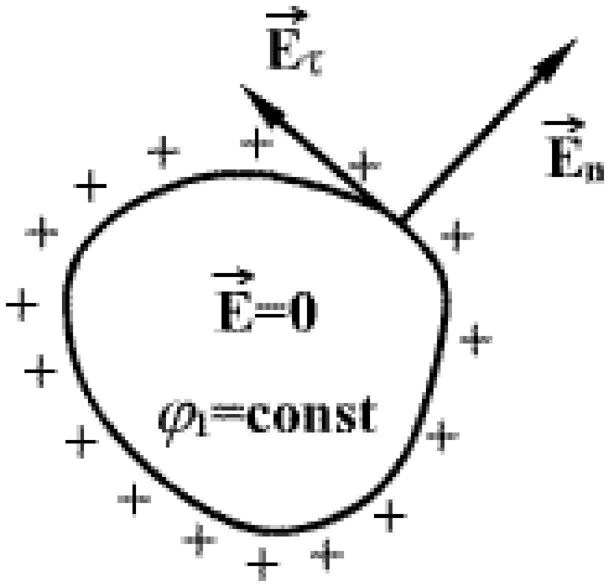
Равновесие зарядов в проводниках.



На поверхности проводника вектор $\boldsymbol{E}$ должен быть направлен по нормали к этой поверхности.

Иначе под действием тангенциальной составляющей вектора напряженности $\boldsymbol{E}_\tau$ заряды бы перемещались по проводнику, что противоречит их статическому распределению.

Равновесие зарядов в проводниках.



В равновесном состоянии:

1) $\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{внутр}} = \boldsymbol{E} = 0.$

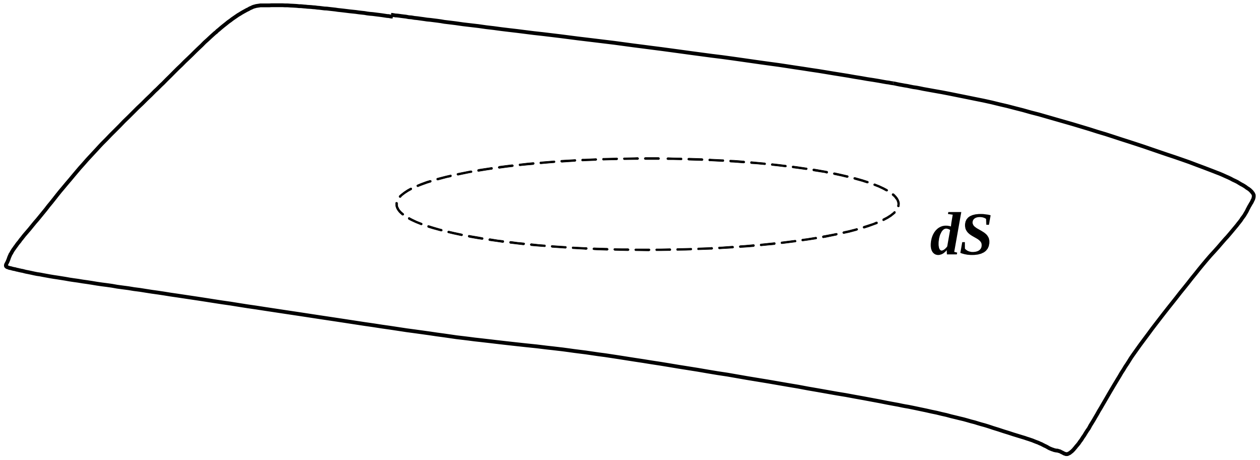
$$\vec{E} = -grad\varphi = -\vec{\nabla}\varphi$$

2) $\boldsymbol{\varphi}_{внутр} = const$ весь объем проводника и его поверхность ***эквипотенциальны***.

3) На поверхности проводника $\vec{E} = \vec{E}_n, \quad \vec{E}_\tau = 0.$

4) $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \Rightarrow \vec{D}_{внутр} = 0$

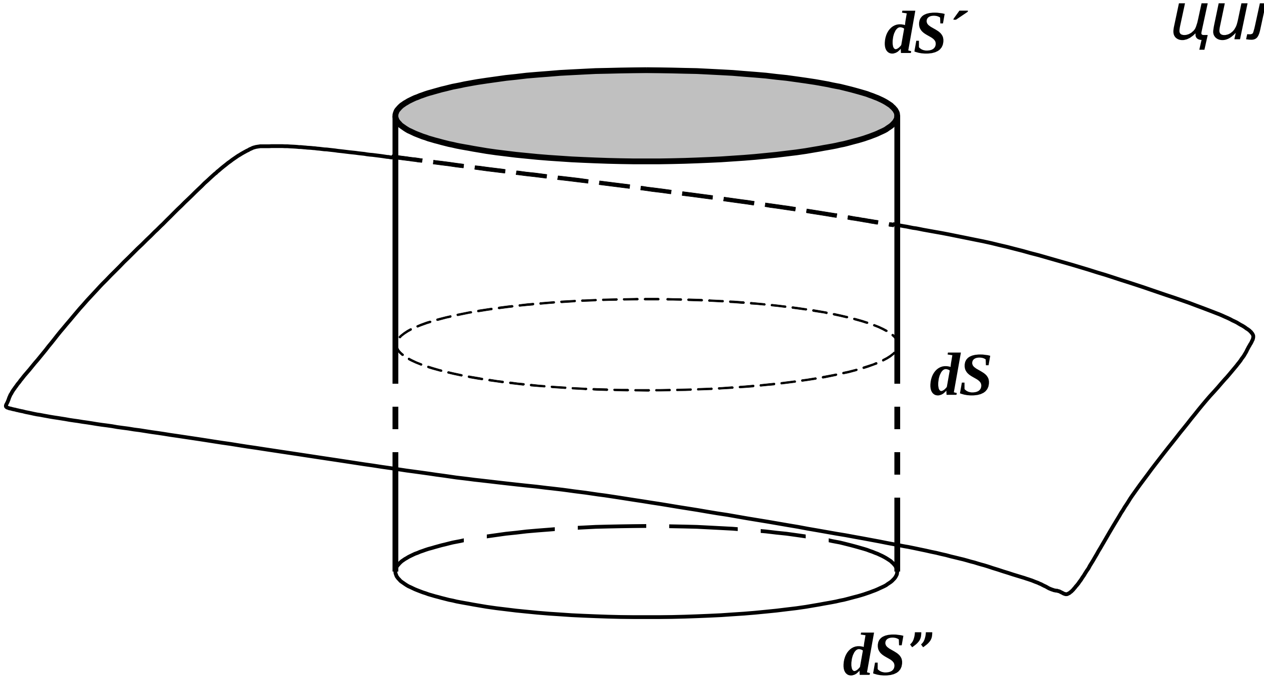
Поле вблизи поверхности заряженного проводника



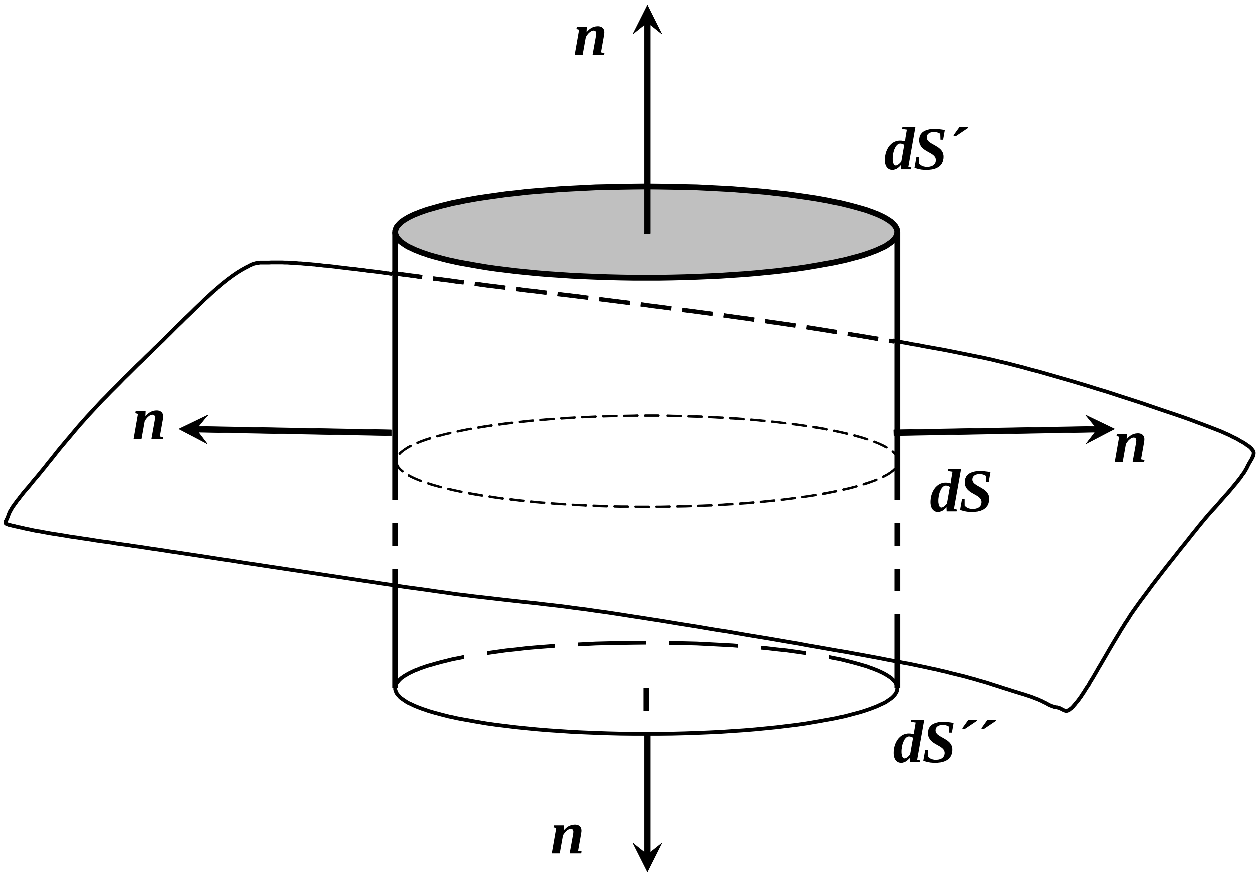
Выделим на поверхности проводника произвольную площадку dS.

Поле вблизи поверхности заряженного проводника

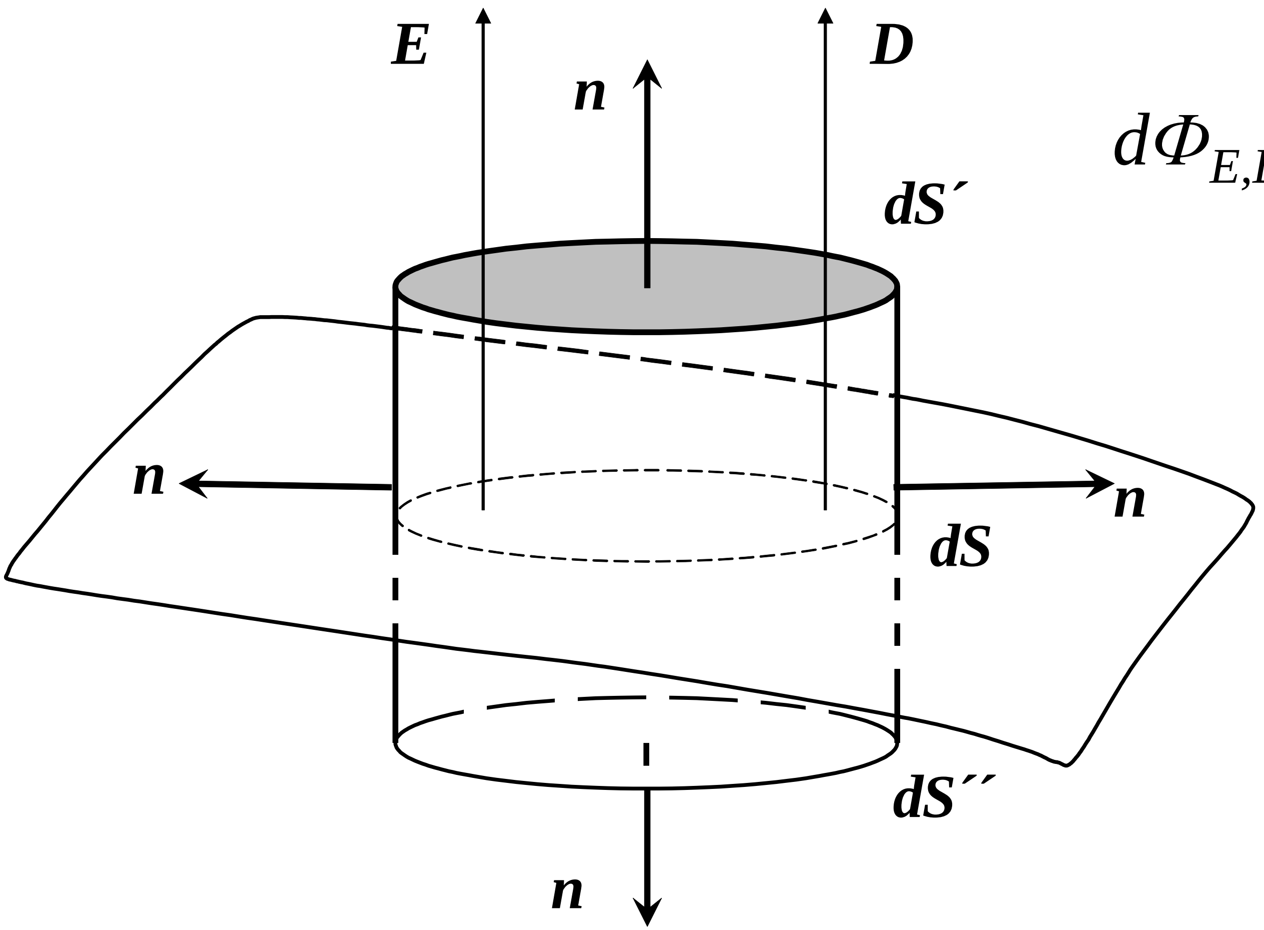
Построим на ней цилиндр высотой **dh**



Поле вблизи поверхности заряженного проводника



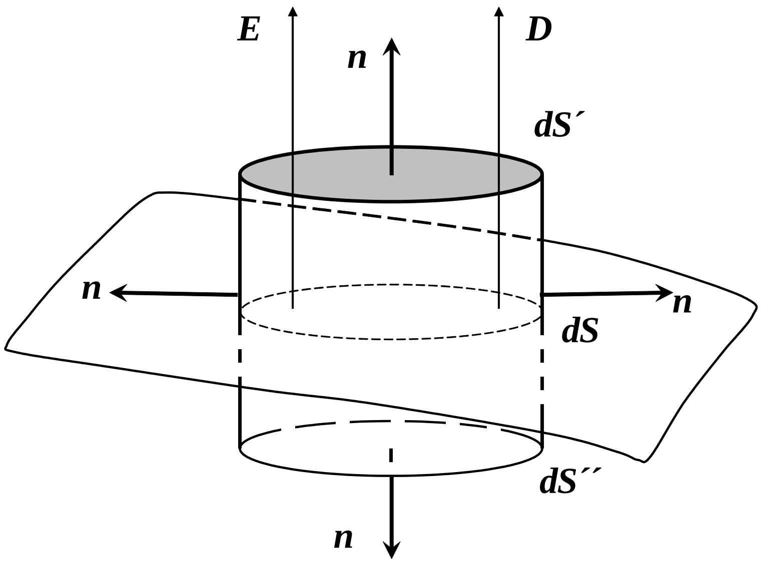
Поле вблизи поверхности заряженного проводника



$$d\Phi_{E,D\ бок..\ поверхность} = 0.$$

$$\vec{D}_{внутр} = 0 \qquad d\Phi_{D\ dS''} = 0$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



$$d\Phi_D = d\Phi_{D\ dS'} = D_n \cdot dS.$$

Теорема Гаусса для ***D****:*

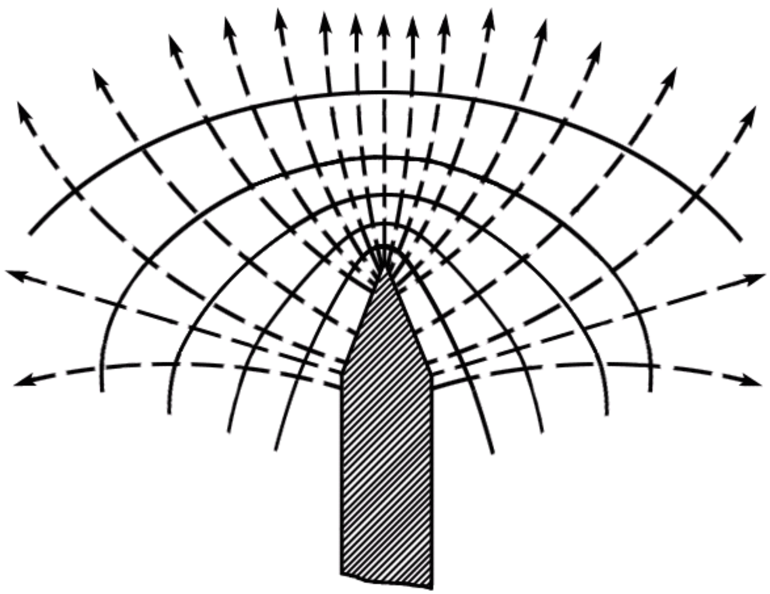
$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = dq = \sigma \cdot dS$$

$$D_n = \sigma$$

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$$

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



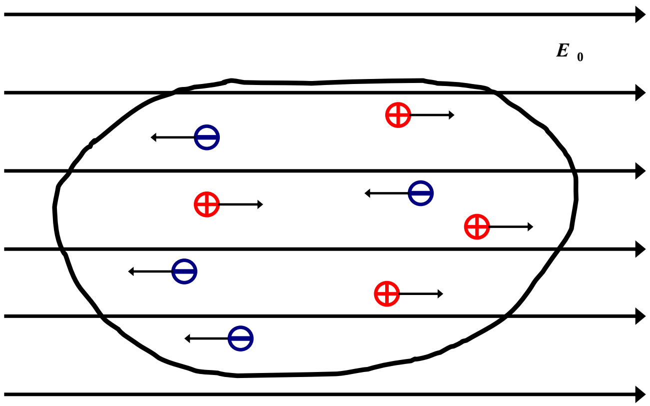
Вектор $\boldsymbol{E}$ вблизи поверхности проводника зависит от ***кривизны поверхности проводника***.

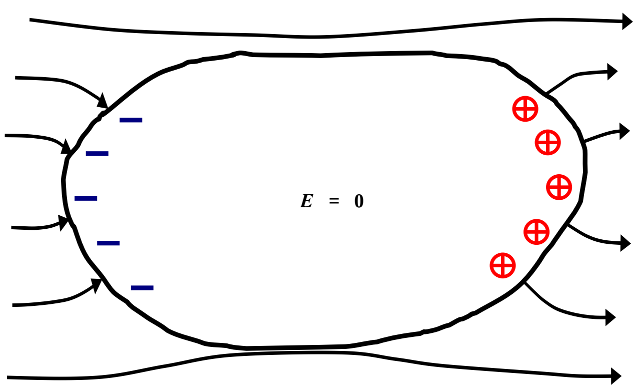
$$C = \frac{1}{R}$$

Распределение зарядов по внешней поверхности проводника зависит только от её формы.

На внутренней поверхности замкнутых полых проводников $\sigma = 0$.

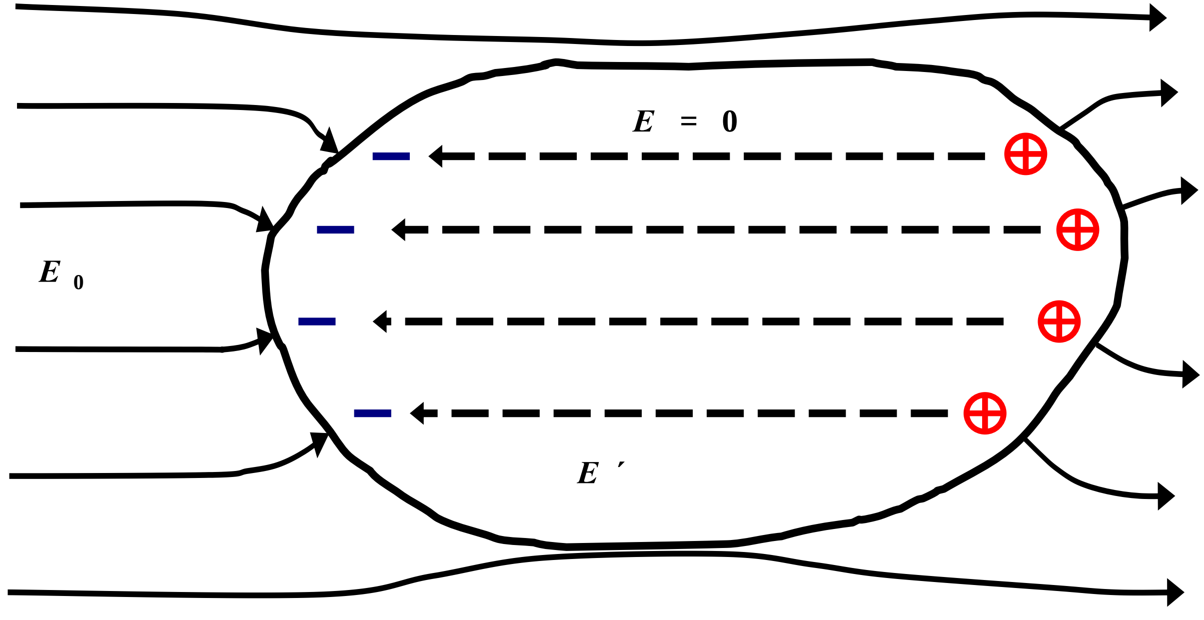
Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



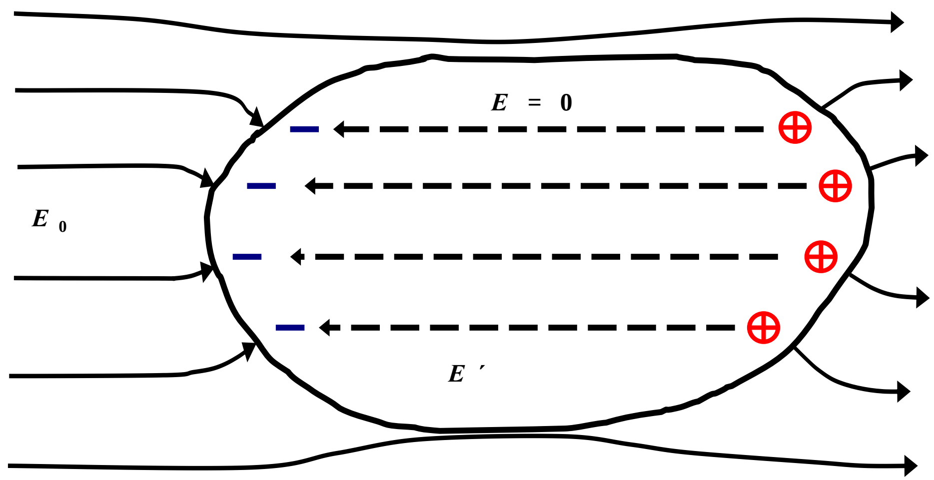


Электроны проводимости и **положительные ионы** *перераспределяются* до тех пор пока внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не **скомпенсирует внешнее поле**.

Электростатическая индукция – явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле.

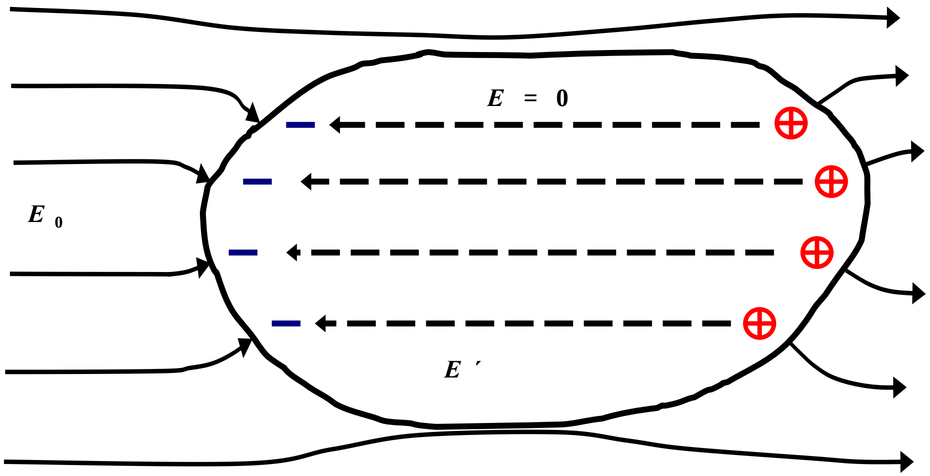


Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



Нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности, они заканчиваются на отрицательных **индуцированных зарядах** и вновь начинаются на положительных.

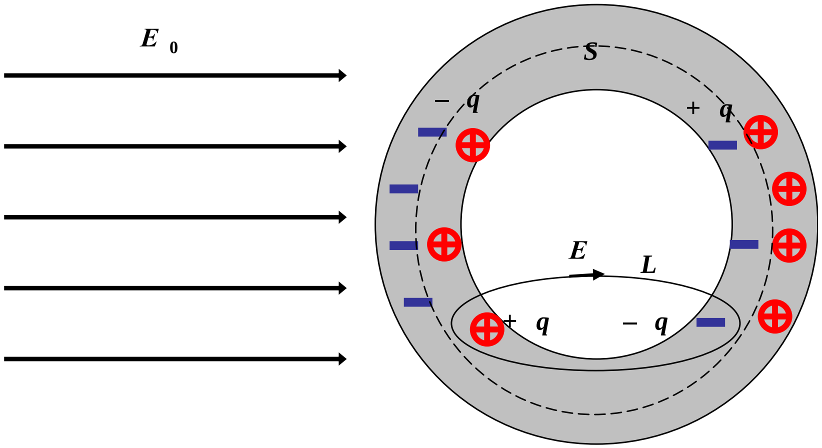
Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



Индуцированные (наведенные) на проводнике заряды исчезают, когда проводник удаляют из электрического поля.

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.

Электрическое поле в полости проводника



$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{\sum q}{\varepsilon_0}$$

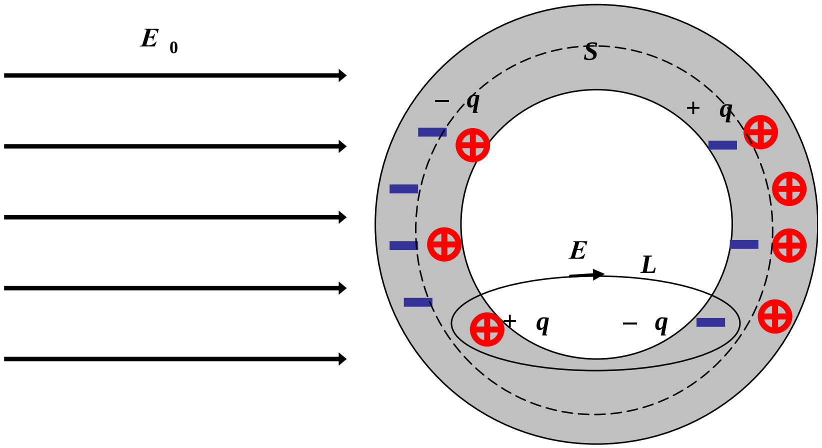
$$\vec{E} = 0$$

$$\sum q = 0$$

$$\sum q = q_+ + q_-$$

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.

Электрическое поле в полости проводника



Если работа по перемещению заряда в полости ≠ 0.

Следовательно, работа по перемещению заряда по замкнутому контуру L отлична от нуля и

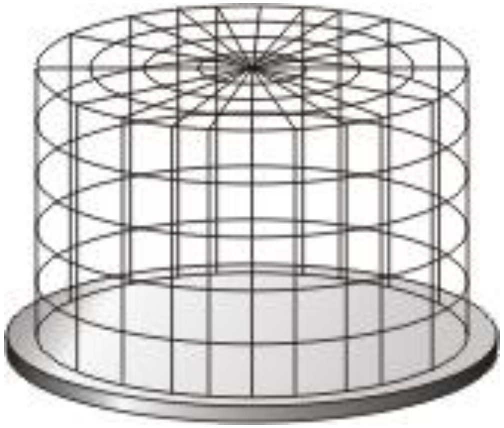
$$\oint_L \vec{E}d\vec{l} \neq 0$$

что невозможно для кулоновских сил.

Поэтому заряды и электростатическое поле внутри полости металла, находящегося в электрическом поле, отсутствуют.

Электростатическая защита

На этом основана электростатическая защита – экранирование тел (измерительные приборы, колебательный контур) от влияния внешних электрических полей.



Опыт Кавендиша

Самостоятельно!

Электроемкость проводника

Электроемкость уединенного проводника

Уединенный проводник – проводник, вблизи которого нет других тел, способных повлиять на распределение зарядов на нем.

Проводнику сообщили заряд q, который распределился по поверхности проводника так, что внутри проводника поле $\boldsymbol{E} = 0$.

Если сообщить проводнику дополнительный заряд, поле внутри $\boldsymbol{E} = 0$, а потенциал на поверхности измениться.

Электроемкость уединенного проводника

Вблизи поверхности проводника $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ $\qquad E \sim \sigma \sim q$

$$\int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$\varphi_2 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = \varphi$$

$$E \sim \varphi$$
$$E \sim q$$

$$\Longrightarrow \qquad q = C\varphi$$

C – коэффициент пропорциональности (электроемкость).

Электроемкость проводника

$$\boxed{C = {}^{q}\!/_{\varphi}}$$

В СИ C измеряется в фарадах [1Ф = 1Кл / 1В].

Электроемкость проводника – это физическая величина численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику, чтобы увеличить его потенциал на **1В**.

Электроемкость шара

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \qquad Edr = -d\varphi$$

Вне шара: $r \geq R, \quad E = \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$

$$\int_R^\infty \frac{q\,dr}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2} = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi$$

Электроемкость шара

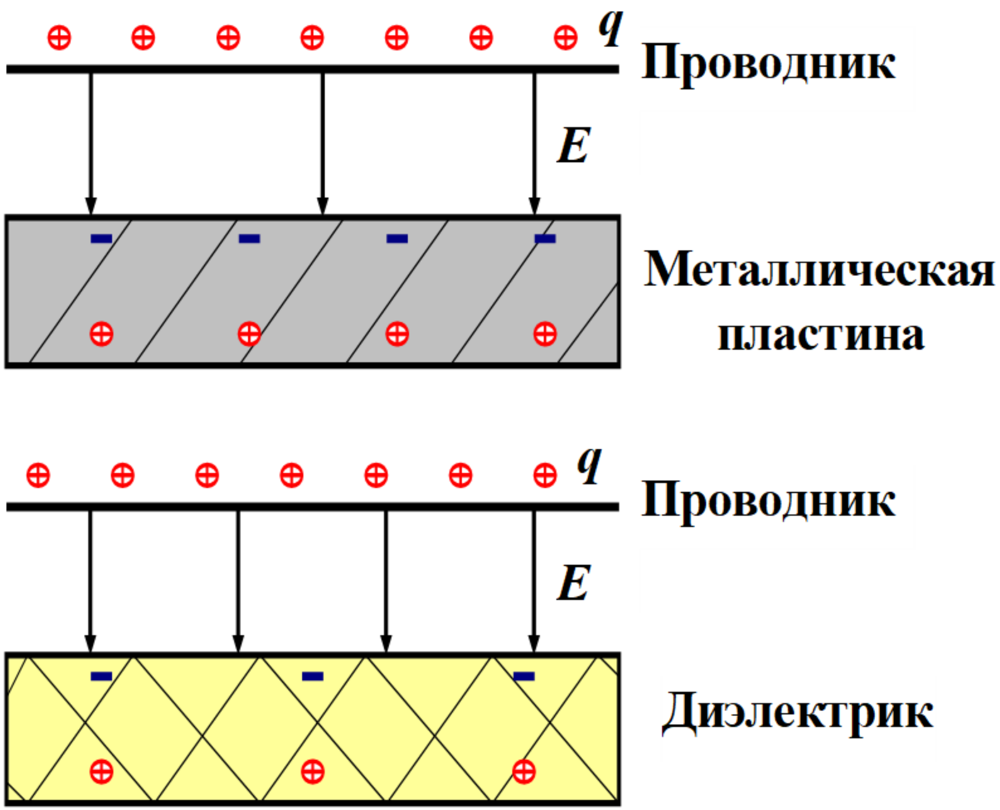
$$\frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\int_R^{\infty}\frac{dr}{r^2}=\varphi_1-\varphi_2, \qquad \varphi_2=\varphi_\infty=0$$

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

$$\boxed{C=4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$$

Электроемкость проводника зависит от его <u>формы</u> и <u>размеров</u>, свойств <u>окружающей среды</u> (ε).

Взаимная электроемкость



$$\varphi = \varphi_{+} + \varphi_{-}; \varphi < \varphi_{+}$$

$$q = const$$

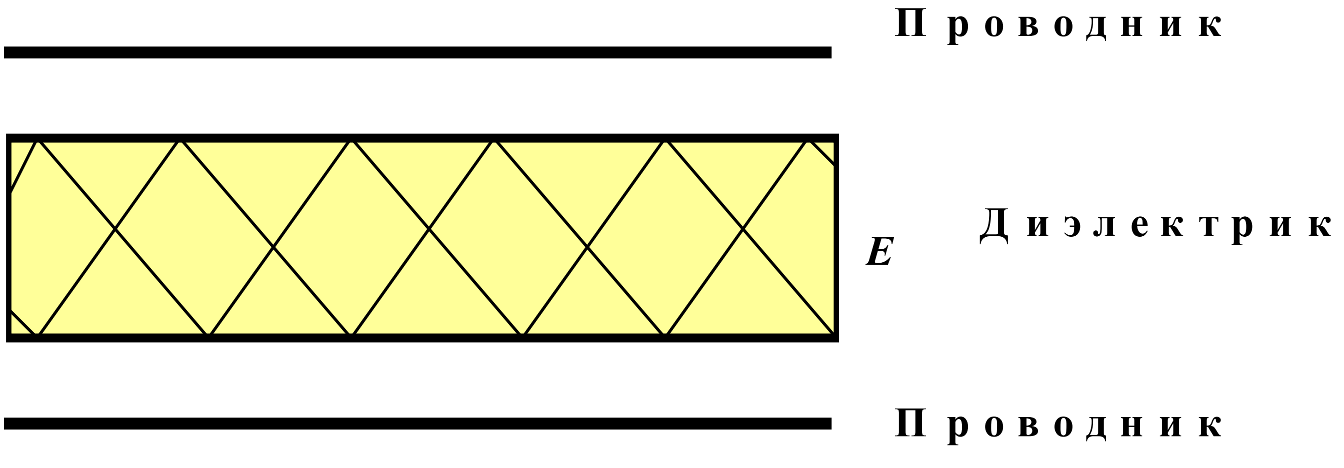
$C = q / \varphi$ - увеличится.

Взаимная электроемкость больше, чем емкость уединенного проводника.

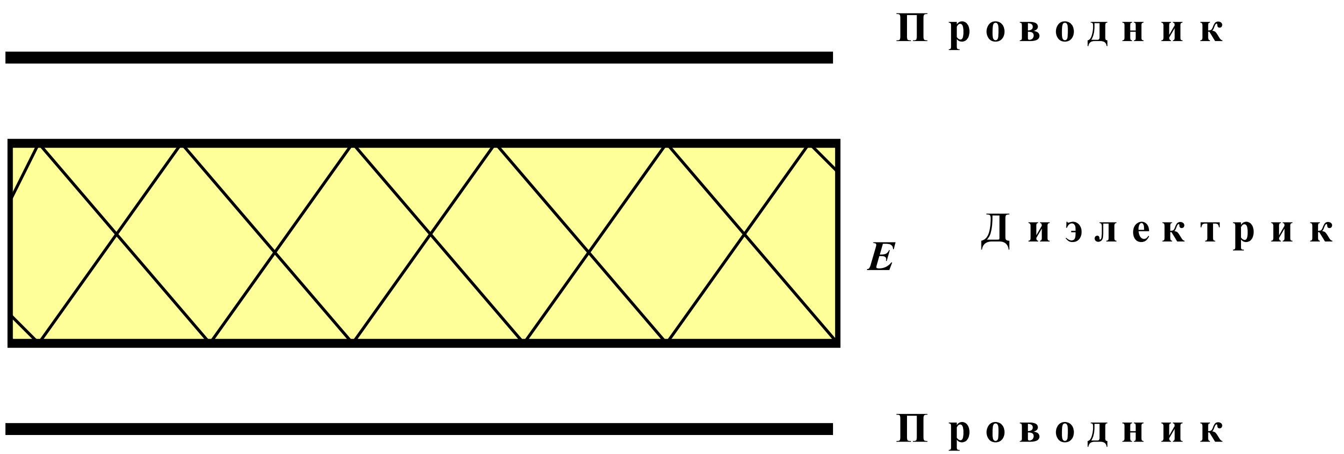
Конденсаторы

Особенно большой электроемкостью обладает конденсатор.

Конденсатор – система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, продольные размеры которых много больше расстояния между ними.



Конденсаторы



Конденсаторы конструируют таким образом, чтобы поле было сосредоточено между обкладками.

В этом случае на емкость конденсатора не оказывают влияния окружающие тела.

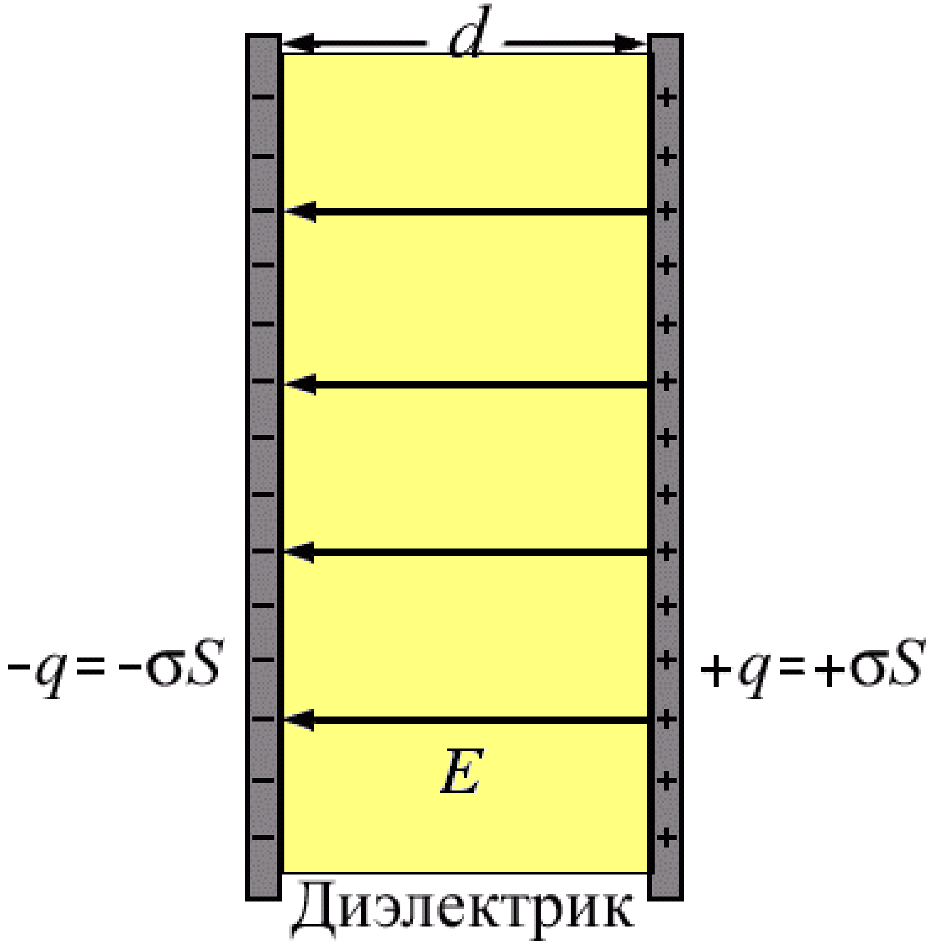
Конденсаторы

Конструктивно конденсаторы бывают ***плоские, цилиндрические, сферические***.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

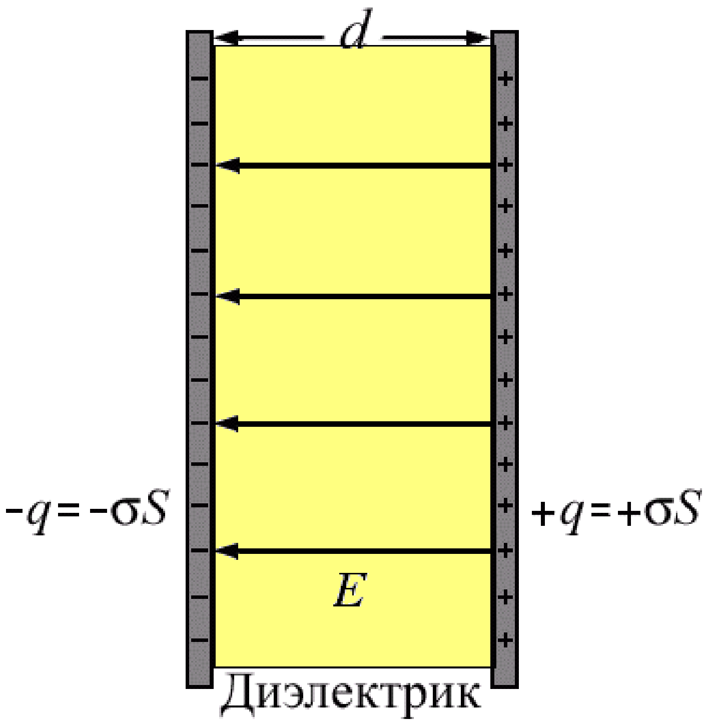
$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов между обкладками;
q – заряд конденсатора.

Плоский конденсатор



Расстояние между обкладками *d* много меньше линейных размеров конденсатора. Следовательно, поле конденсатора можно рассматривать как поле между двумя бесконечными пластинами.

Плоский конденсатор



$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \qquad E = -\frac{d\varphi}{dr}$$

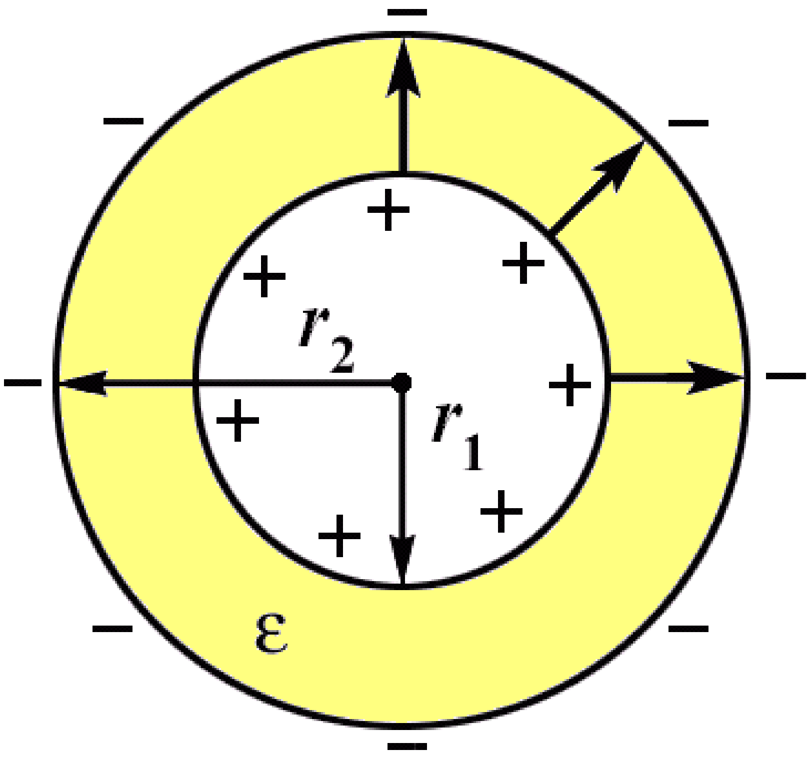
$$\int_0^d \frac{\sigma dr}{\varepsilon\varepsilon_0} = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi$$

$$\frac{\sigma \cdot d}{\varepsilon\varepsilon_0} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$q = \sigma S$$

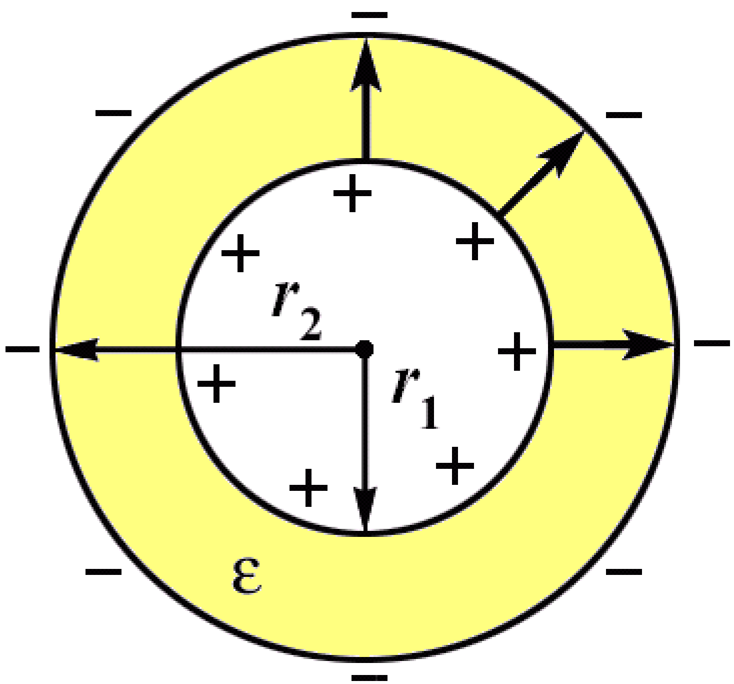
$$\boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}}$$

Сферический конденсатор



Состоит из двух концентрических обкладок сферической формы, разделенных слоем диэлектрика.

Сферический конденсатор



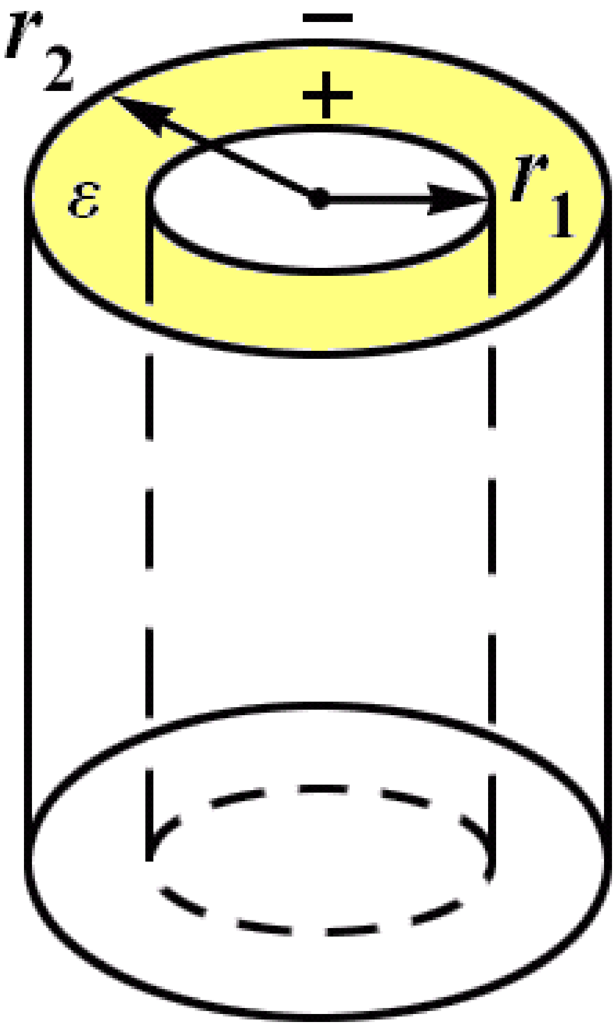
Поле равномерно заряженной
ферической поверхности (вне сферы)
квивалентно полю точечного заряда:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

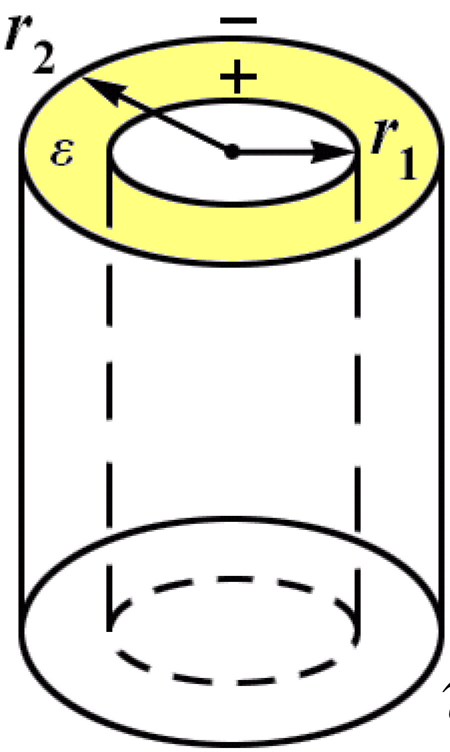
$$\Rightarrow \boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0\frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}}$$

Цилиндрический конденсатор



Состоит из двух полых коаксиальных цилиндров с радиусами r_1 и r_2, вставленных один в другой ($r_1 < r_2$) и разделенных слоем диэлектрика.

Цилиндрический конденсатор



$r_1 < r_2$; r_1, r_2 < длины

поля бесконечного заряженного цилиндра:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1}$$

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

$$\boxed{C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\frac{r_2}{r_1}}}$$

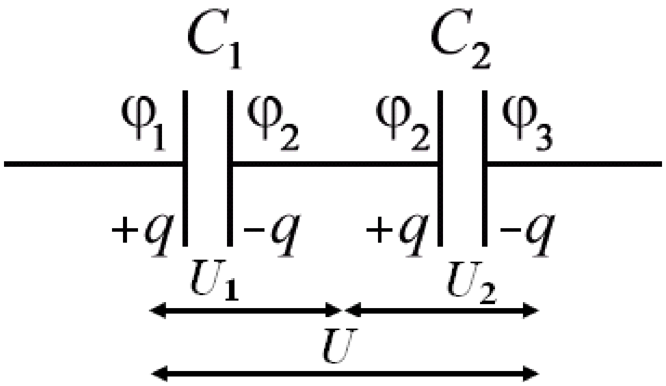
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}\ln\frac{r_2}{r_1}$$

Конденсаторы

Конденсаторы характеризуются пробивным напряжением – разность потенциалов, при которой происходит пробой – электрический разряд через слой диэлектрика. Пробивное напряжение зависит от формы обкладок, свойств диэлектрика и его толщины.

Соединения конденсаторов

Последовательное соединение конденсаторов



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

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

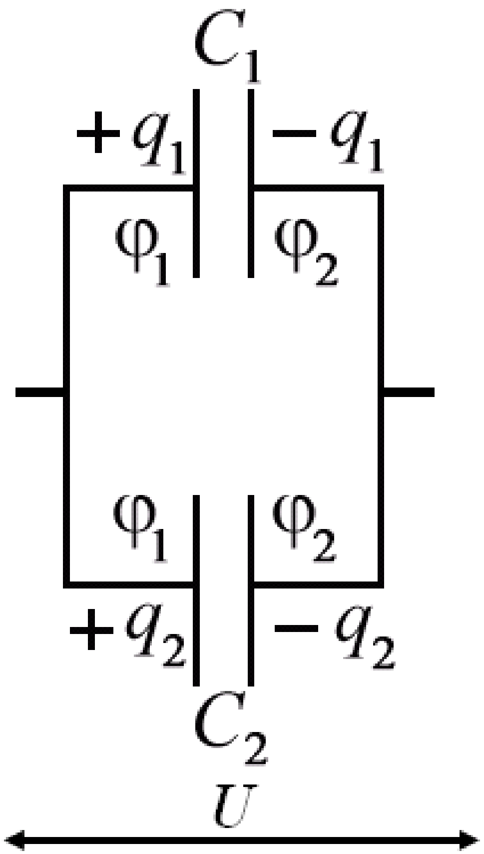
Для *n* конденсаторов:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}}$$

$$C < C_1,\ C < C_2$$

Если конденсаторы одинаковы, то общая емкость $C = C / n$.

Соединения конденсаторов
Параллельное соединение конденсаторов



- Разность потенциалов на обкладках конденсаторов одинакова и равна $\boldsymbol{U}$.
- Заряд батареи согласно закону сохранения заряда $\boldsymbol{q_1 + q_2 = const}$.

$$C_1U + C_2U = CU$$

$$C_1 + C_2 = C$$

$$\boxed{C = \sum_{i=1}^{n} C_i}$$

Энергия заряженного проводника

В поле уединенного проводника перемещаем заряд dq.

При переносе заряда dq из ∞ на проводник емкостью C
имеющий потенциал φ,

совершается работа:

$$dA = \varphi \cdot dq$$

$$\varphi = \frac{q}{C} \quad \Rightarrow \quad dA = \frac{q dq}{C}$$

При этом заряд проводника увеличивается на dq.

Энергия заряженного проводника

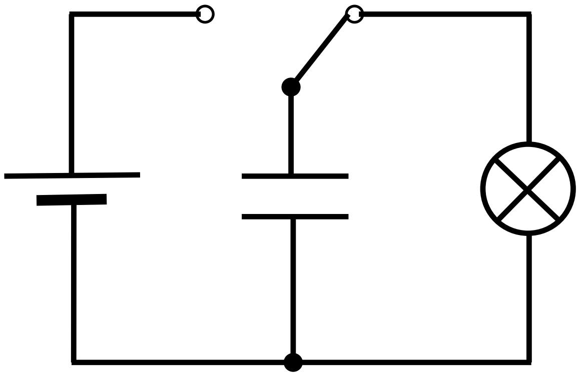
Работа, затрачиваемая на зарядку проводника от нулевого потенциала ($\boldsymbol{\varphi}$ = 0) до $\boldsymbol{\varphi}$

$$A = \int dA = \int \frac{q dq}{C} = \frac{q^2}{2C}$$

Энергия заряженного проводника равна работе, которую необходимо совершить, чтобы зарядить этот проводник:

$$\boxed{W = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2}}$$

Энергия заряженного конденсатора



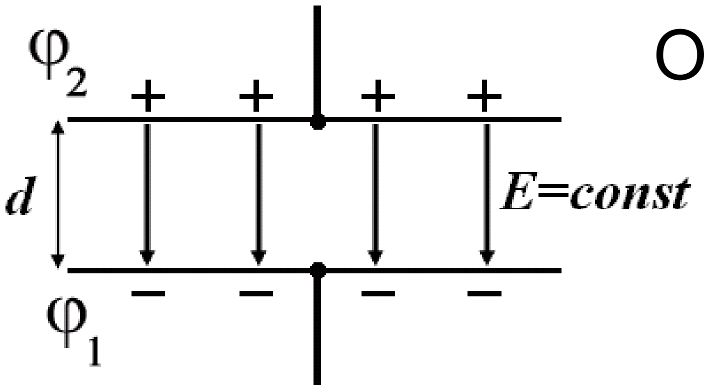
Если заряженный конденсатор <u>замкнуть</u> на электрическую <u>лампочку</u>, то она какое-то время будет гореть.

Следовательно, конденсатор <u>***обладает энергией***</u>.

$$\left.\begin{aligned} dA &= U \cdot dq \\ U &= \frac{q}{C} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad dA = \frac{q\,dq}{C}$$

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

Объемная плотность энергии электрического поля



Объемная плотность энергии:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{2Sd}$$

$$\omega = \frac{C(Ed)^2}{2Sd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S(Ed)^2}{d \cdot 2Sd}$$

$$\boxed{\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}}$$

- энергия, приходящаяся на единичный объем однородного поля.

$$dW = \omega \cdot dV \qquad W = \int_V \omega \cdot dV$$