

Физика

Электростатика (продолжение)

10.8. Типы диэлектриков. Поляризация диэлектриков.

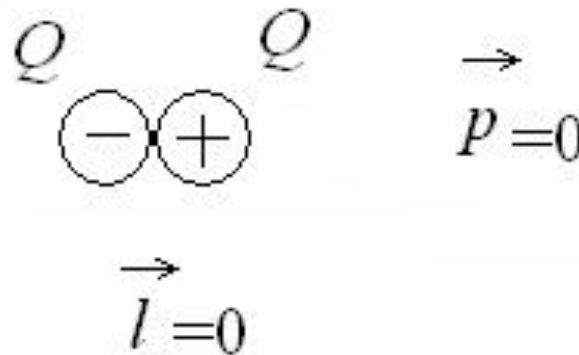
Диэлектриком называется вещество, не проводящее электрический ток. Основное свойство диэлектрика – способность поляризоваться во внешнем электрическом поле.

В зависимости от вида молекул диэлектрики делятся на три группы.

Первую группу диэлектриков составляют вещества, молекулы которых симметричны (H_2 , O_2 , CO_2).

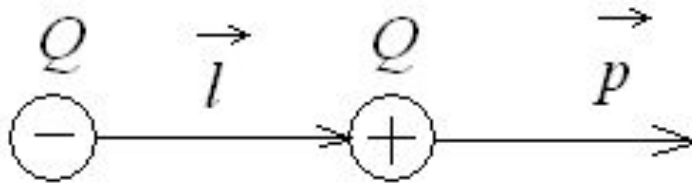
Центры положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают и дипольный момент молекулы \vec{p} равен нулю. Молекулы таких диэлектриков называются неполярными.

$$\vec{p} = |Q| \cdot \vec{l}$$



Вторую группу диэлектриков составляют вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение (H_2O , CO ,...).

Центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают.

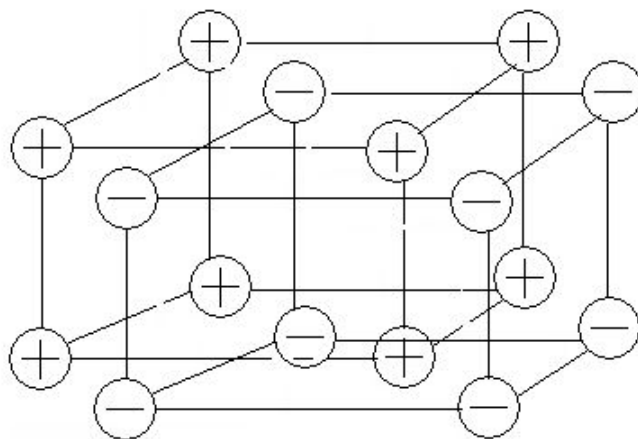


$$\vec{p} = |Q| \cdot \vec{l}.$$

Молекулы таких диэлектриков в отсутствие внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Они называются полярными.

При отсутствии внешнего поля суммарный дипольный момент равен нулю. Под действием внешнего поля молекулы ориентируются одинаково, и в результате возникает результирующий момент.

Третью группу диэлектриков составляют вещества, молекулы которых имеют ионное строение (NaCl, KCl ...). Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков.



Ионные кристаллы можно рассматривать, как совокупность двух подрешеток, который под действием внешнего поля сдвигаются, образуя дипольные моменты.

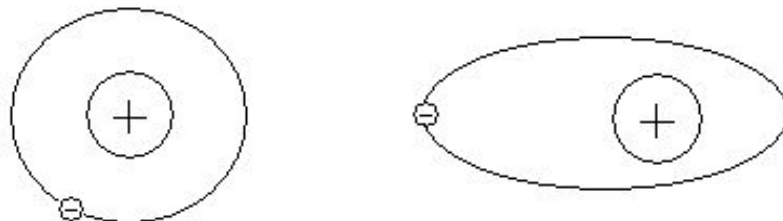
У всех трех видов диэлектриков под действием внешнего поля появляется дипольный (электрический) момент. Это явление называется поляризацией.

Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появления под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей.

Соответственно трем группам диэлектриков различают три вида поляризации:

1. Электронная, или деформационная поляризация.

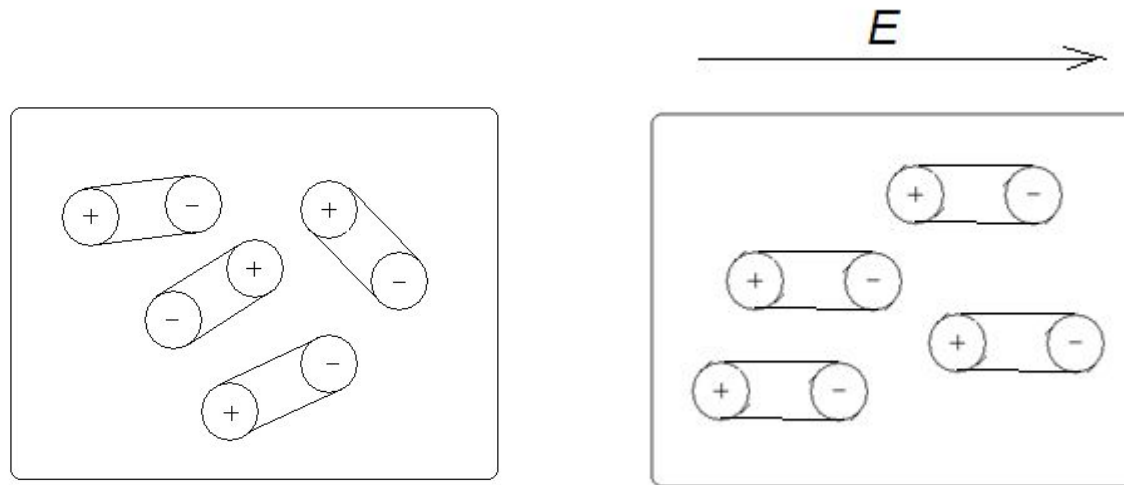
Она заключается в возникновении у атомов дипольного момента за счет деформации электронных орбит.



Электроны деформированных оболочек образуют с положительными зарядами ядер атомов пару взаимно связанных зарядов, которые называются упругими диполями.

2. Ориентационная, или дипольная, поляризация диэлектрика с полярными молекулами.

Она заключается в ориентации имеющихся дипольных моментов молекул по полю.



3. Ионная поляризация диэлектриков с ионными кристаллическими решетками, заключающаяся в смещении подрешетки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных — против поля, приводящем к возникновению дипольных моментов.

Поляризованность и напряженность поля в диэлектрике

При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле он поляризуется, т. е. приобретает отличный от нуля дипольный момент:

$$p_v = \sum_i p_i.$$

Для количественного описания поляризации диэлектрика пользуются векторной величиной — поляризованностью.

Поляризованность — дипольный момент единицы объема диэлектрика.

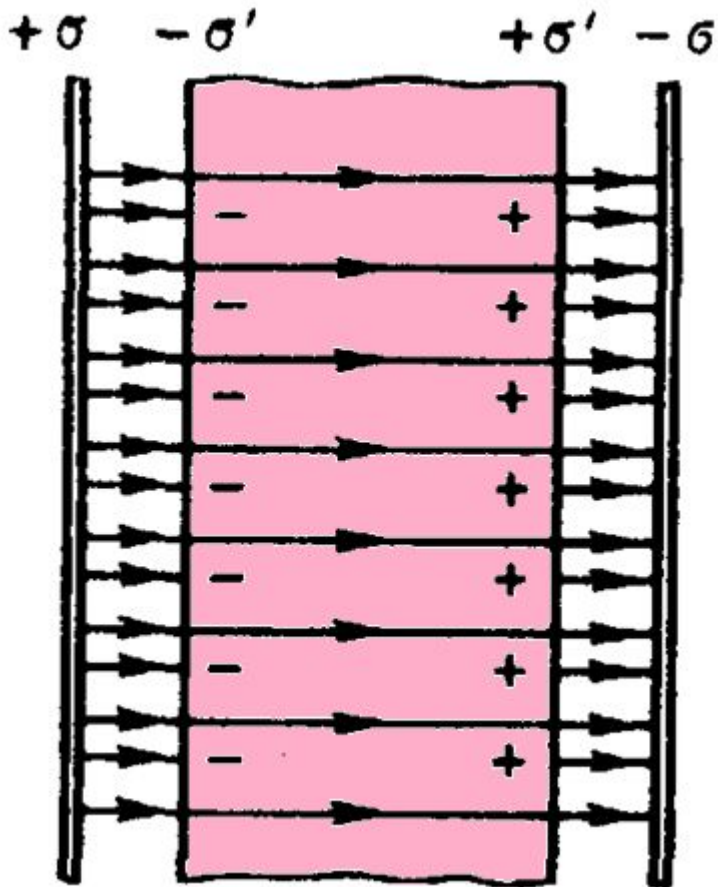
$$P = \frac{p_v}{V} = \sum_i \frac{p_i}{V}.$$

Поляризованность P линейно зависит от напряженности поля E :

$$P = \chi \varepsilon_0 E.$$

χ — диэлектрическая восприимчивость вещества, характеризующая свойства диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость



Пластина из однородного диэлектрика помещена в однородное внешнее электрическое поле E_0 .

Под действием поля диэлектрик поляризуется, т. е. происходит смещение зарядов: положительные смещаются по полю, отрицательные — против поля.

Заряды $+\sigma'$ и $-\sigma'$ называются связанными зарядами, появляющиеся в результате поляризации диэлектрика.

Связанные заряды вызывают появление электрического поля E' , которое направлено против внешнего поля E_0 .

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0},$$

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} \quad \text{- поле, созданное двумя бесконечными заряженными плоскостями.}$$

Определим поверхностную плотность связанных зарядов σ' .
Полный дипольный момент пластинки диэлектрика:

$$p_V = PV = PSd.$$

С другой стороны: $Q' = \sigma'S, \quad p_V = \sigma'Sd.$

Приравняем и получим: $PSd = \sigma'Sd,$

$$\sigma' = P$$

- поверхностная плотность связанных зарядов σ' равна поляризованности P .

$$E = E_0 - \chi E,$$

откуда напряженность результирующего поля внутри диэлектрика равна:

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E_0}{\epsilon}.$$

Безразмерная величина $\epsilon = 1 + \chi$.

называется диэлектрической проницаемостью среды.

ϵ показывает, во сколько раз поле ослабляется диэлектриком, и характеризует количественно свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле.

10.9. Электрическое смещение. Теореме Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

Вектор напряженности E , переходя через границу диэлектриков, претерпевает скачкообразное изменение. Поэтому необходимо характеризовать поле еще вектором электрического смещения:

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E.$$

Вектор электрического смещения можно записать еще как:

$$D = \varepsilon_0 E + P.$$

Единица электрического смещения — кулон на метр в квадрате (Кл/м²).

Вектором D описывается электростатическое поле, создаваемое *свободными зарядами*.

Для произвольной *замкнутой* поверхности S поток вектора D сквозь эту поверхность определяется выражением:

$$\Phi_D = \oint_S D \, dS = \oint_S D_n \, dS,$$

D_n — проекция вектора D на нормаль n к площадке dS .

Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике:

$$\oint_S D \, dS = \oint_S D_n \, dS = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

- «поток вектора смещения электростатического поля в диэлектрике сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности *свободных* электрических зарядов».

Для вакуума: $D_n = \varepsilon_0 E_n$,

тогда поток вектора напряженности E сквозь произвольную замкнутую поверхность равен:

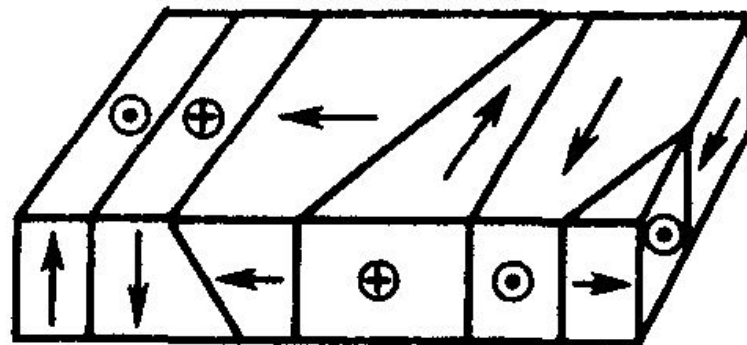
$$\oint_S \varepsilon_0 E_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

- теорема Гаусса для вакуума.

10.10. Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики

Сегнетоэлектрики — диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью.

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой совокупность доменов — областей с различными направлениями поляризованности.



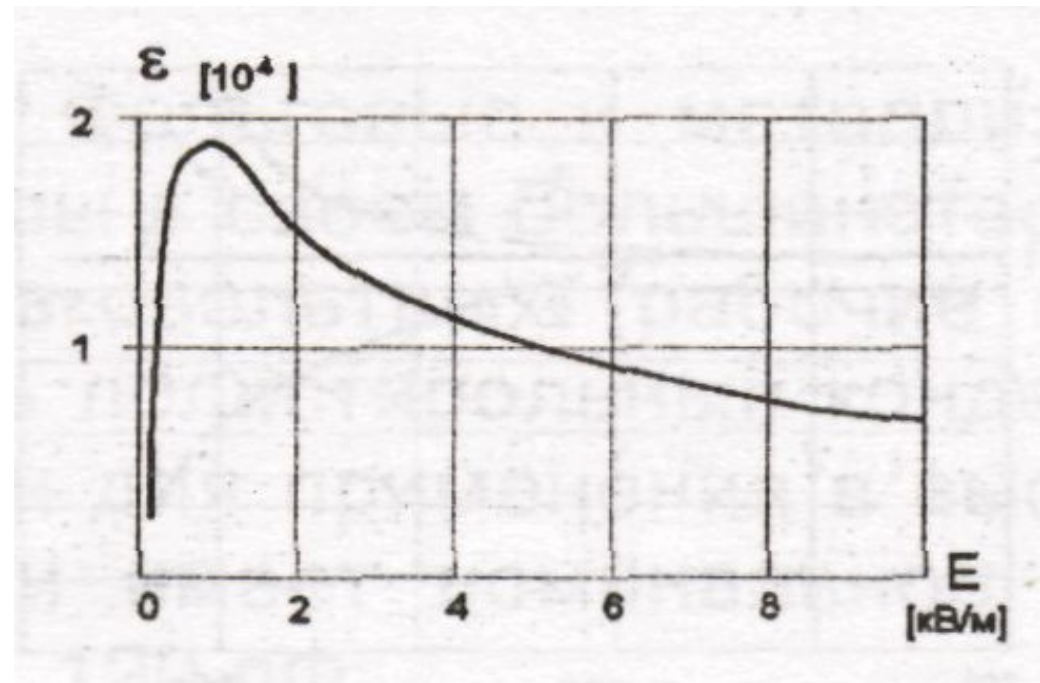
Суммарный дипольный момент диэлектрика равен нулю.

При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю

Особенности сегнетоэлектриков

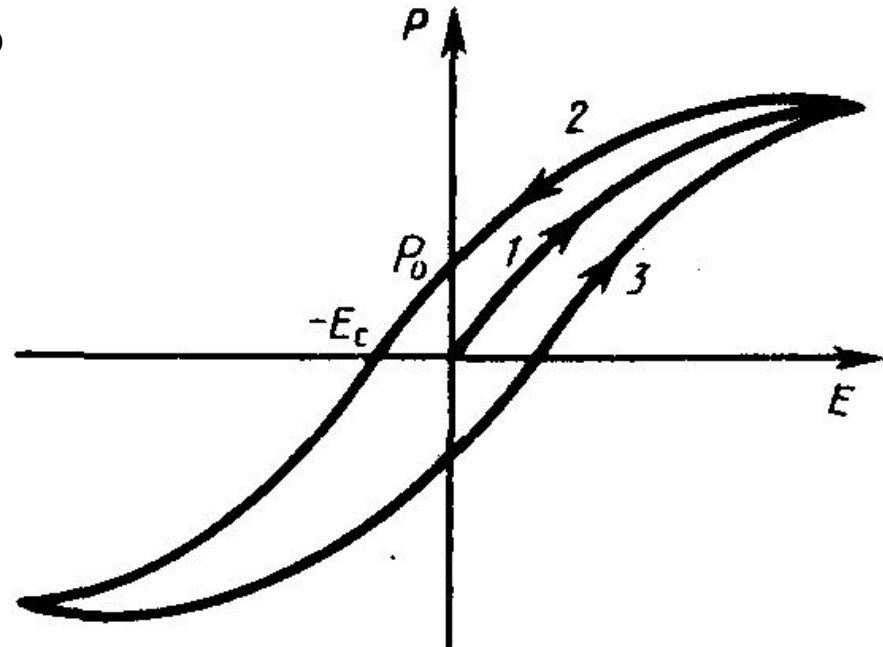
1. Смещение доменных границ под действием даже небольшого электрического поля определяет высокие значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков

Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры и напряженности электрического поля.



2. При доменной поляризации наблюдается явление гистерезиса. Это явление определяет большие потери энергии.

Явление диэлектрического гистерезиса:



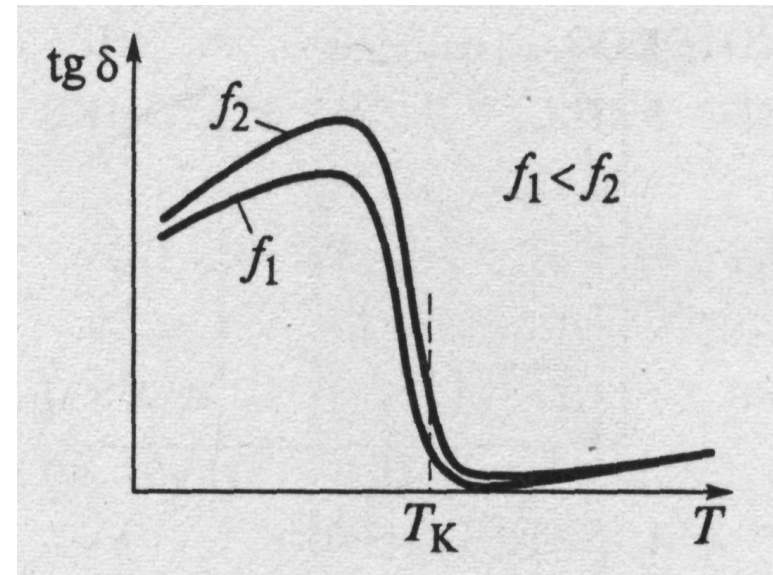
P_0 - остаточная поляризованность.

E_c - коэрцитивная сила.

3. Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры.

Для каждого сегнетоэлектрика имеется определенная температура, выше которой его необычные свойства исчезают и он становится обычным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри.

Потери на гистерезис, как и доменная поляризация, существуют лишь до точки Кюри. При нагревании выше этой температуры доменная структура исчезает и наблюдается резкое снижение $\text{tg}\delta$.



Пьезоэлектрики

К пьезоэлектрическим материалам относятся кристаллические и поликристаллические вещества с ярко выраженным пьезоэфффе́ктом.

Пьезоэфффе́кт заключается в появлении электрических зарядов разного знака на противоположных гранях кристаллов при их механической деформации (сжатии, растяжении, изгибе, кручении) вследствие поляризации.

Обратный пьезоэфффе́кт состоит в том, что приложение к пластине постоянного напряжения вызывает в ней деформацию.

Пьезоэлектрики называют активными диэлектриками и применяют в датчиках давления и смещения.



Принцип действия

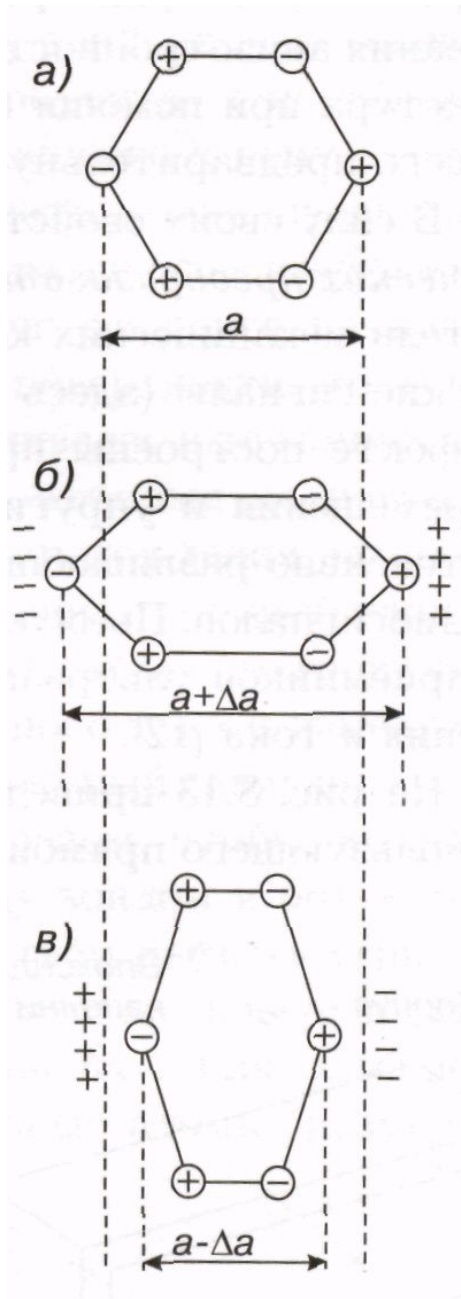
Гексагональная элементарная ячейка содержит чередующиеся положительные и отрицательные ионы.

При отсутствии внешних механических напряжений дипольный момент ячейки равен нулю.

Если под действием таких напряжений ячейка растянется или сожмется, то возникает дипольный момент:

$$P = \pm q \cdot \Delta a.$$

Растяжение или сжатие приводит к тому, что на двух противоположных гранях кристалла возникают электрические заряды.



10.11. Электрическая емкость уединенного проводника. Конденсаторы.

Рассмотрим уединенный проводник, т. е. проводник, который удален от других проводников, тел и зарядов. Его потенциал прямо пропорционален заряду проводника.

Из опыта следует, что разные проводники, будучи одинаково заряженными, имеют различные потенциалы. Поэтому для уединенного проводника можно записать:

$$Q = C \varphi.$$

Величина $C = \frac{Q}{\varphi}$ называется емкостью уединенного проводника.

Емкость уединенного проводника определяется зарядом, сообщением которого проводнику изменяет его потенциал на единицу.

Единица емкости — фарад (Ф): 1 Ф — емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл.

Потенциал уединенного шара радиуса R , находящегося в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , равен:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon R}.$$

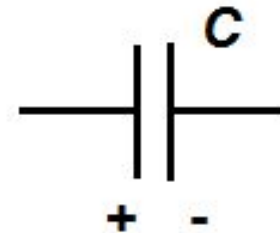
Емкость шара: $C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R.$

Отсюда следует, что емкостью 1 Ф обладал бы уединенный шар, находящийся в вакууме и имеющий радиус $R = C/(4\pi\epsilon_0) \approx 9 \cdot 10^6$ км, что примерно в 1400 раз больше радиуса Земли.

Конденсаторы

Конденсаторы – это устройства, обладающие способностью при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать значительные по величине заряды.

Конденсатор состоит из двух проводников, разделенных диэлектриком:



Конденсаторы бывают:

- 1) плоские - две плоские пластины;
- 2) цилиндрические - два коаксиальных цилиндра;
- 3) Сферические - две концентрические сферы.

Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, равная отношению заряда Q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

1. Рассчитаем емкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга и имеющих заряды $+Q$ и $-Q$.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon},$$

Заменив $Q = \sigma S$, получим выражение для емкости плоского конденсатора:

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

2. Определим емкость цилиндрического конденсатора, состоящего из двух полых коаксиальных цилиндров с радиусами r_1 и r_2 ($r_2 > r_1$), вставленных один в другой.

Разность потенциалов между обкладками для поля равномерно заряженного бесконечного цилиндра с линейной плотностью $\tau = Q/l$ (l —длина обкладок) :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

3. Определим емкость сферического конденсатора, состоящего из двух concentрических обкладок, разделенных сферическим слоем диэлектрика.

Разность потенциалов между двумя точками, лежащими на расстояниях r_1 и r_2 ($r_2 > r_1$) от центра заряженной сферической поверхности:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Емкость сферического конденсатора:

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

Емкость конденсатора любой формы прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками.

Соединения конденсаторов

Параллельное соединение конденсаторов

У параллельно соединенных конденсаторов разность потенциалов на обкладках конденсаторов одинакова и равна $\phi_A - \phi_B$.
Если емкости отдельных конденсаторов C_1, C_2, \dots, C_n , то их заряды равны:

$$Q_1 = C_1(\phi_A - \phi_B),$$

...

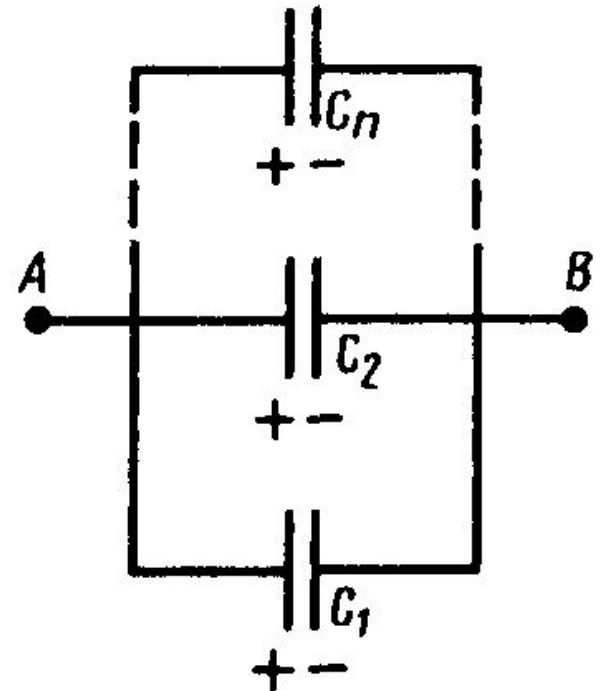
$$Q_n = C_n(\phi_A - \phi_B).$$

а заряд батареи конденсаторов:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = (C_1 + \dots + C_n)(\phi_A - \phi_B).$$

Полная емкость батареи:

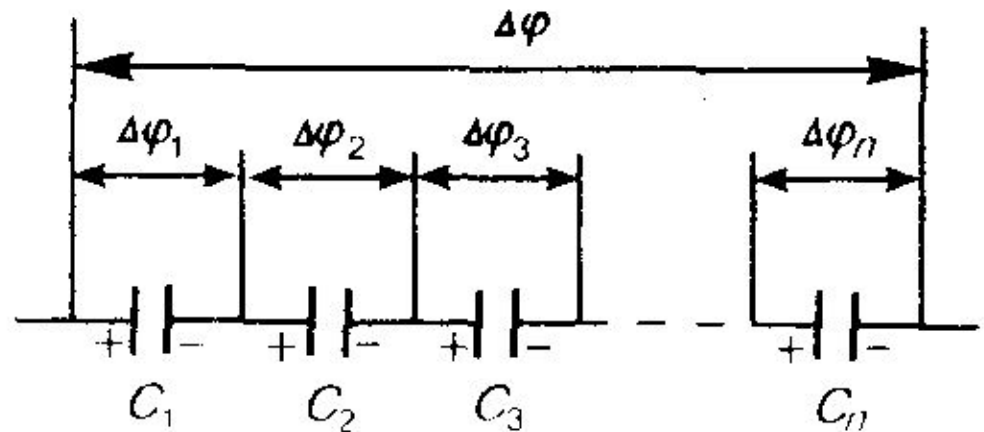
$$C = \frac{Q}{\phi_A - \phi_B} = C_1 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i.$$



Последовательное соединение конденсаторов.

У последовательно соединенных конденсаторов заряды всех обкладок равны по модулю, а разность потенциалов на зажимах батареи:

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i,$$



Для любого из рассматриваемых конденсаторов $\Delta\varphi_i = Q/C_i$.

$$\Delta\varphi = \frac{Q}{C} = Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i},$$

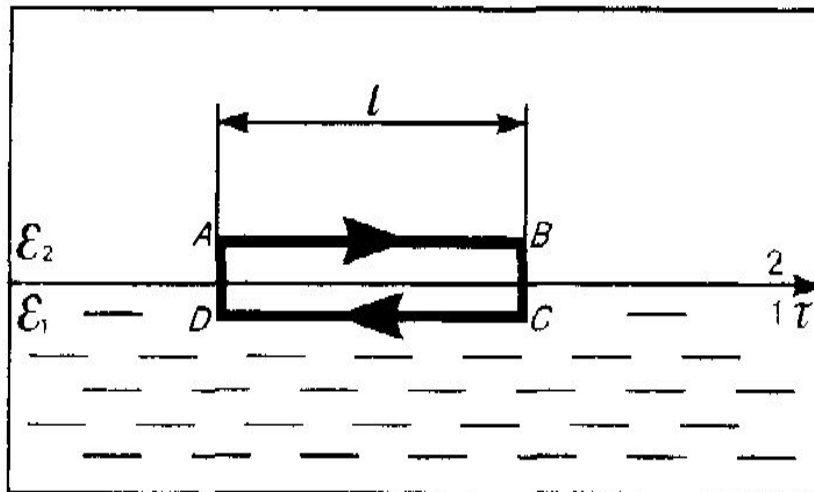
т. е. при последовательном соединении конденсаторов суммируются величины, обратные емкостям.

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

10.12. Условия на границе раздела двух диэлектрических сред

Рассмотрим связь между векторами E и D на границе раздела двух однородных изотропных диэлектриков.

Диэлектрические проницаемости сред ϵ_1 и ϵ_2 .



Построим вблизи границы раздела диэлектриков 1 и 2 небольшой замкнутый прямоугольный контур $ABCD$ длины l .

Циркуляция вектора E :

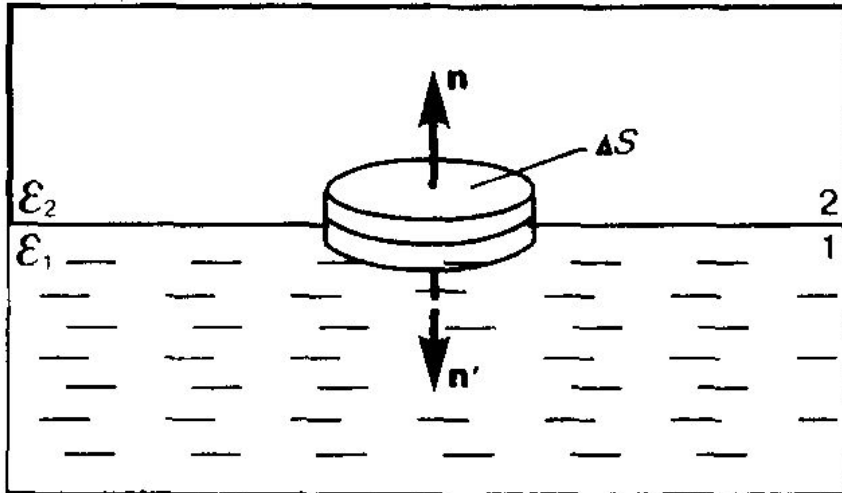
$$\oint_{ABCD} E dl = 0,$$

Тогда: $E_{\tau 1} I - E_{\tau 2} I = 0.$

Значит: $E_{\tau 1} = E_{\tau 2}.$

Заменяя, согласно проекции вектора E проекциями вектора D , деленными на $\varepsilon_0 \varepsilon$, получим:

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



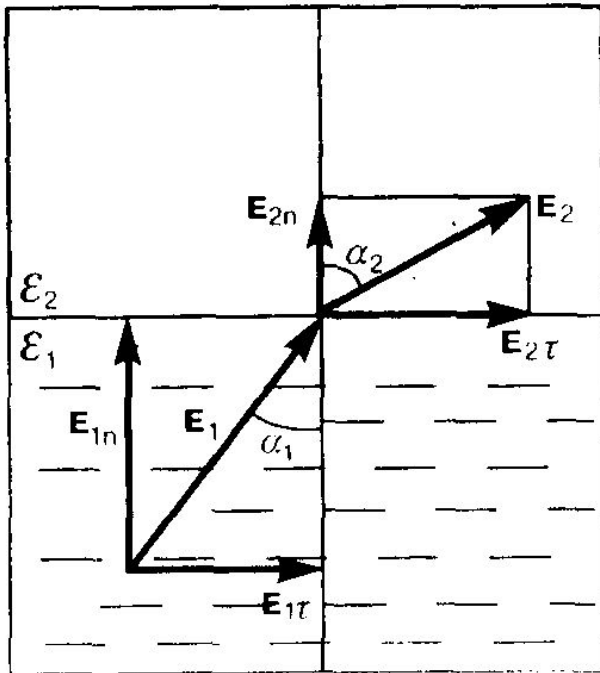
На границе раздела двух диэлектриков построим прямой цилиндр ничтожно малой высоты, одно основание которого находится в первом диэлектрике, другое — во втором.

Основания ΔS настолько малы, что в пределах каждого из них вектор \mathbf{D} одинаков.

Согласно теореме Гаусса:

$$D_{n2}\Delta S - D_{n1}\Delta S = 0.$$

Значит:
$$D_{n1} = D_{n2}.$$



Заменяя проекции вектора D проекциями вектора E , умноженными на $\epsilon_0 \epsilon$, получим:

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

Выводы:

1. При переходе через границу раздела двух диэлектрических сред тангенциальная составляющая вектора E (E_τ) и нормальная составляющая вектора D (D_n) изменяются непрерывно.
2. При переходе через границу нормальная составляющая вектора E (E_n) и тангенциальная составляющая вектора D (D_τ) претерпевают скачок.
3. При переходе через границу вектора E и D преломляются.

Найдем связь между углами α_1 и α_2 .

Разложим векторы E_1 и E_2 у границы раздела на тангенциальные и нормальные составляющие.

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1} = \frac{E_{\tau 2} / E_{n 2}}{E_{\tau 1} / E_{n 1}}.$$

Закон преломления линий напряженности E и линий смещения D :

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

Эта формула показывает, что, входя в диэлектрик с большей диэлектрической проницаемостью, линии E и D удаляются от нормали.

10.13. Проводники в электростатическом поле

Если проводник поместить в электростатическое поле, то это поле будет действовать на заряды проводника, в результате чего они начнут перемещаться.

Заряды будут перемещаться до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль.

Тогда напряженность поля во всех точках внутри проводника будет равна нулю:

$$E = 0.$$

Отсутствие поля внутри проводника означает, что потенциал во всех точках внутри проводника постоянен ($\phi = \text{const}$), т. е. поверхность проводника в электростатическом поле является *эквипотенциальной*.

Заряд Q , находящийся внутри проводника в некотором объеме, ограниченном произвольной замкнутой поверхностью, равен:

$$Q = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \oint_S D_n dS = 0.$$

так как во всех точках внутри поверхности $D=0$.

Согласно теореме Гаусса, этот поток ($D\Delta S$) равен сумме зарядов ($Q=\sigma\Delta S$), охватываемых поверхностью: $D\Delta S=\sigma\Delta S$ т.е.

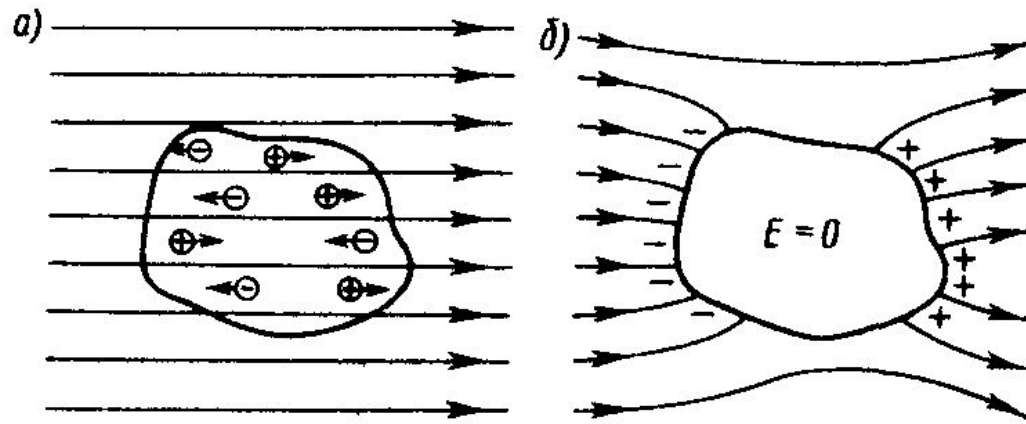
$$D = \sigma.$$

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

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

Если во внешнее электростатическое поле внести нейтральный проводник, то свободные заряды будут перемещаться: положительные — по полю, отрицательные — против поля.

На одном конце проводника будет скапливаться избыток положительного заряда, на другом — избыток отрицательного. Эти заряды называются *индуцированными*.



Процесс будет происходить до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника — перпендикулярными его поверхности.

Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника.

Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется ***электростатической индукцией***.

Индуцированные заряды появляются на проводнике вследствие ***смещения*** их под действием поля, т. е. σ является поверхностной плотностью смещенных зарядов.

Электрическое смещение D вблизи проводника численно равно поверхностной плотности смещенных зарядов. Поэтому вектор D получил название ***вектора электрического смещения***.