

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

*Проводники* – вещества, хорошо проводящие электрический ток. В этих веществах имеются свободные носители заряда, концентрация которых достигает  $10^{29} \text{ м}^{-3}$ . проводниками являются металлы, электролиты, расплавы, ионизованные газы, плазма и т. д.

*Диэлектрики* – вещества, плохо проводящие электрический ток. При не очень высоких температурах и не очень сильных полях диэлектрики проводят ток в  $10^{15} - 10^{20}$  раз хуже, чем проводники. Свободных носителей зарядов в диэлектриках почти нет. Диэлектриками являются газы при обычных условиях, многие чистые жидкости, слюда, фарфор, мрамор и т. д.

*Полупроводники* – вещества, которые по способности проводить электрический ток занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Полупроводниками являются некоторые химически чистые элементы (Ge, Si, Se) и многие химические соединения.

## ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

### Распределение зарядов на проводнике

Электрические заряды, сообщённые проводнику извне, в состоянии равновесия распределяются так, что *электрическое поле внутри проводника отсутствует*

$$\vec{E} = 0$$

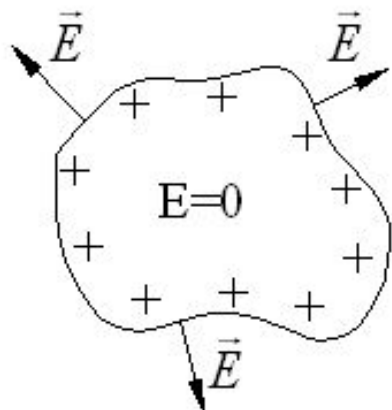


Рис. 1

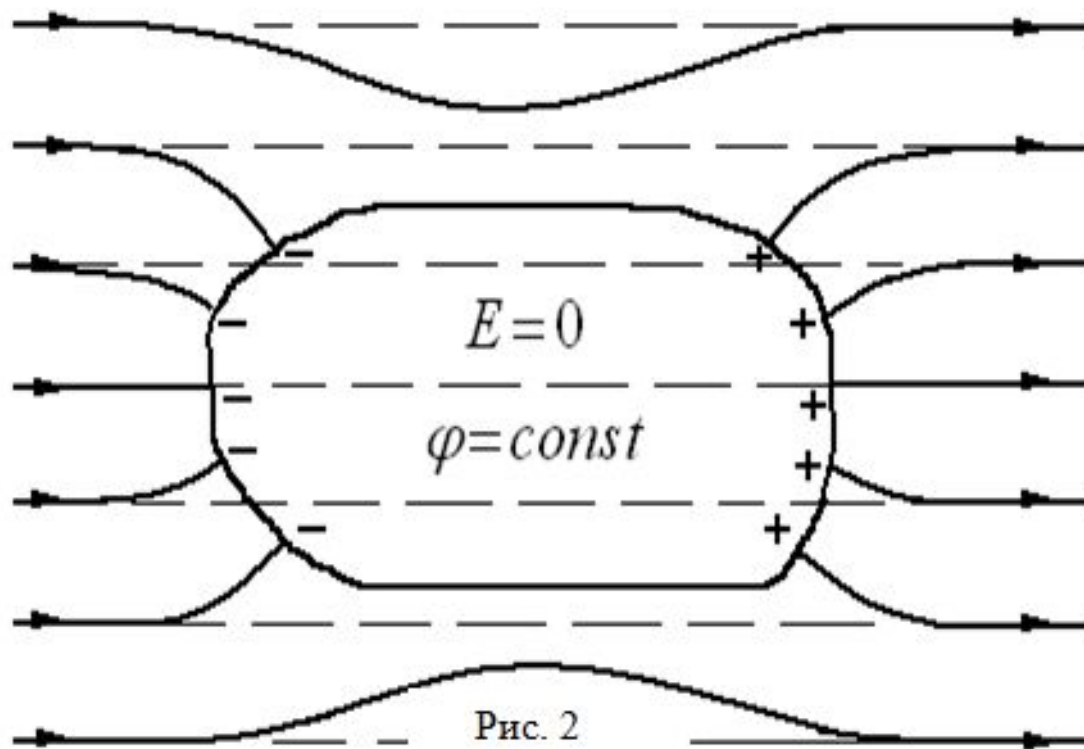
Это вытекает из закона сохранения энергии. Если бы выполнялось условие  $\vec{E} \neq 0$ , то в проводнике протекал бы ток без дополнительных источников энергии. Избыточные заряды, сообщенные проводнику в состоянии равновесия, распределяются только по внешней поверхности проводника (рис. 1). Из условия равновесия зарядов следует, что

потенциал всех точек проводника как внутри, так и на поверхности одинаков. Это ясно из условия  $\vec{E}=0$ ; так как

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}, \text{ то } \varphi = \text{const.}$$

Таким образом, в условиях равновесия зарядов и *поверхность, и объем проводника являются эквипотенциальными.*

## Проводник во внешнем электрическом поле



Если незаряженный проводник внести во внешнее электрическое поле, то в нем возникает явление электростатической индукции: свободные заряды проводника под действием поля смещаются: положительные в направлении вектора  $\vec{E}$ , отрицательные – в противоположную сторону.

В результате на поверхности проводника появляются заряды, называемые *индуцированными*. Эти заряды создают внутри проводника свое собственное поле, противоположенное по направлению внешнему полю. Разделение зарядов в проводнике происходит до тех пор, пока результирующее электростатическое поле в проводнике не исчезнет. Это наблюдается при любых напряженностях внешнего поля. *Индукционные заряды всегда полностью компенсируют внешнее поле внутри проводника, так что  $\vec{E}_{\text{внутри}} = 0$ , потенциал всех точек проводника одинаков ( $\varphi = \text{const}$ ), а вне проводника линии напряженности перпендикулярны к его поверхности. Следовательно, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных (рис. 2).*

Индуцированные заряды в отличие от связанных, можно снять с проводника и отделить друг от друга.

Индуцированные заряды могут вызывать перераспределение зарядов, создающих внешнее поле и искажение внешнего поля. На рис. 3а показаны силовые линии поля равномерно заряженной сферы, на рис. 3б – искажение силовых линий, возникшее при внесении в поле сферы дополнительного незаряженного проводника.

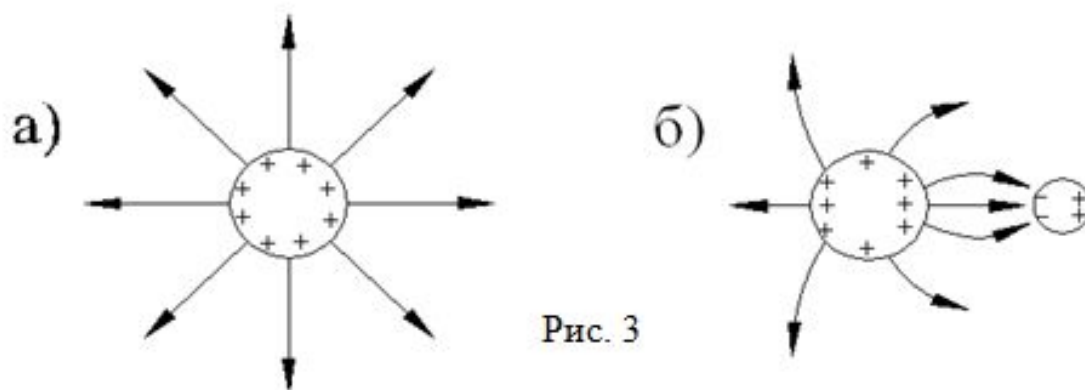


Рис. 3

Электрическое поле внутри проводника отсутствует независимо от того, сплошной проводник или полый, так как индуцированные заряды располагаются только на внешней поверхности проводника. На этом основана электростатическая защита. Когда какой-то прибор необходимо защитить от действия внешних полей, его окружают проводящим экраном. Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами.

## Електроємкость провідників

Между зарядом уединенного проводника и его потенциалом существует пропорциональная зависимость

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

*Електроємкость уединенного проводника – скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и численно равная заряду, который необходимо сообщить незаряженному проводнику, чтобы потенциал его стал равен единице при условии, что все другие тела бесконечно удалены и что потенциал бесконечно удалённых точек принят равным нулю.*

Емкость уединенного проводника зависит от формы и размеров проводника, от диэлектрической проницаемости окружающей среды. Не зависит от материала проводника, температуры, агрегатного состояния, размеров и формы внутренних полостей, заряда и потенциала.

Чтобы рассчитать емкость проводника, надо вычислить потенциал, обусловленный зарядом проводника. Например, у уединенного шара радиуса  $r$ , помещенного в однородную безграничную среду с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , появляется потенциал  $\varphi$  при сообщении ему заряда  $q$ .

$$\text{Так как } \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \text{ и } C = \frac{q}{\varphi} \text{ то}$$

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r$$



## Взаимная емкость. Конденсатор

Уединенные проводники обладают небольшой емкостью и не способны накапливать сколько-нибудь заметные электрические заряды. Если проводник не является уединенным, то его емкость зависит и от относительного расположения окружающих проводник тел. Индуцированные на телах заряды ослабляют поле, созданное зарядом  $q$  в том месте, где находится проводник. В результате потенциал проводника уменьшается, а емкость увеличивается. Эффект особенно усиливается, если к заряженному проводнику приближать тела, заряженные разноименно с зарядом проводника.

Располагая соответствующим образом проводники и заполняя пространство между ними диэлектриками с высокой диэлектрической проницаемостью, можно сосредоточить на проводниках значительные заряды.

*Взаимной электроемкостью двух проводников называется величина, численно равная абсолютной величине заряда, который необходимо перенести с одного проводника на другой, чтобы абсолютная величина разности потенциалов между ними стала равной единице:*

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

Чтобы взаимная электроемкость проводников не зависела от окружающих тел, нужно, чтобы электрическое поле, созданное зарядами проводников, было сосредоточено только между проводниками. Это достигается тем, что проводникам придают форму либо двух близко расположенных параллельных пластин, либо двух коаксиальных цилиндров, либо концентрических сфер и сообщают им равные по абсолютной величине и противоположные по знаку заряды. Такая система проводников называется *конденсатором*. Проводники, образующие конденсатор, называются *обкладками*. Абсолютную величину заряда одной из обкладок называют *зарядом конденсатора*.

Емкостью конденсатора называется физическая величина численно равная отношению заряда конденсатора к абсолютной величине разности потенциалов между его обкладками:

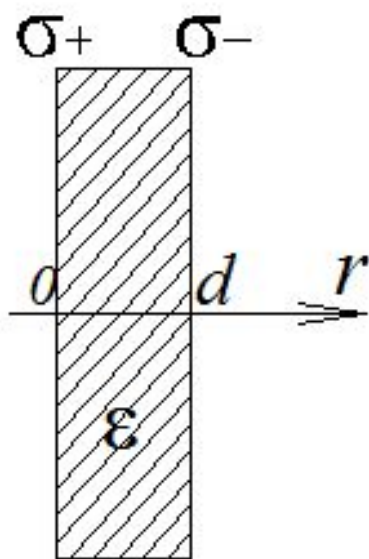


Рис. 4

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

Емкость конденсатора зависит от его формы, размеров, взаимного расположения обкладок, диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками. Выведем формулу емкости плоского конденсатора (рис. 4). Пусть  $S$  – площадь одной обкладки,  $d$  – расстояние между обкладками,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

Найдем разность потенциалов между обкладками, используя связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля в интегральной форме.

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

Но заряд конденсатора равен  $q = \sigma S$

Тогда

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma S \varepsilon \varepsilon_0}{\sigma d}, \quad \text{или} \quad C = \frac{S \varepsilon \varepsilon_0}{d}$$

# ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

## Электрический диполь

*Электрический диполь* – это система двух равных по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов  $q_+$  и  $q_-$ , смещенных на некоторое расстояние  $l$  друг относительно друга (рис. 5).



Рис. 5

Ориентацию диполя в пространстве указывает плечо диполя  $\vec{l}$  – вектор, проведенный от отрицательного заряда к положительному и равный по модулю расстоянию между зарядами.

Вектор  $\vec{p}$ , равный произведению модуля одного из зарядов диполя на плечо диполя называется электрическим дипольным моментом:

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

В соответствии с принципом суперпозиции, напряженность  $\vec{E}$ , создаваемая диполем в произвольной точке равна сумме напряженностей  $\vec{E}_+$  и  $\vec{E}_-$ , создаваемых зарядами  $q_+$  и  $q_-$  диполя.

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

## Поляризация диэлектриков

Во внешнем электрическом поле диэлектрики поляризуются, то есть сами становятся источниками электрического поля. Поляризация сопровождается появлением на внешних границах диэлектрика поверхностного электрического заряда, называемого связанным или поляризационным.

Связанные – заряды, входящие в состав молекул диэлектрика, а не сообщенные извне. Избыточный заряд, сообщенный диэлектрику извне, называют свободным (это не значит, что свободный заряд может свободно перемещаться по объему диэлектрика).

Явление поляризации объясняется тем, что во внешнем электрическом поле молекулы диэлектрика представляют собой электрические диполи, ориентированные так, что их дипольные моменты направлены преимущественно вдоль вектора напряженности электрического поля. В результате поляризации диэлектрик в целом приобретает определенный дипольный момент.

Количественно результат поляризации диэлектрика принято характеризовать двумя величинами:

Во-первых, распределение поверхностного связанного заряда на диэлектрике характеризуется его *поверхностной плотностью*  $\sigma'$

$$\sigma' = \frac{dq'}{dS}$$

Во-вторых, количественной характеристикой интенсивности поляризации служит *поляризованность*  $\vec{P}$  – величина, равная дипольному моменту единицы объема поляризованного диэлектрика.



В случае однородной поляризации 
$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_i}{\Delta V},$$

где  $\vec{p}_i$  - дипольный момент  $i$ -ой молекулы.

Опыт показывает, что в изотропном диэлектрике при не очень высоких частотах изменения поля  $\vec{E}$

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

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость вещества, величина, показывающая, как сильно поляризуется данное вещество во внешнем электрическом поле и численно равная модулю вектора поляризованности, приобретаемого диэлектриком в

поле с напряженностью  $E = \left| \frac{1}{\varepsilon_0} \right| \left| \frac{H}{Kл} \right|.$

## Виды поляризации

Различают несколько основных видов поляризации:

1. *Электронная деформационная* поляризация. Она наблюдается в диэлектриках с так называемыми неполярными молекулами. Известно, что молекулы построены из атомов. Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, обращающихся вокруг ядра.



Рис. 6

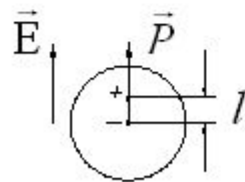


Рис. 7

Молекула, у которой центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают в отсутствие внешнего поля (электрический дипольный момент молекулы равен нулю) называется неполярной. На рис. 6 схематически показана такая неполярная молекула. Диэлектрики с неполярными молекулами –  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , He, Ne, Ar,  $CH_4$ , полистирол.

Внешнее электрическое поле деформирует электронные оболочки молекул, смещает их центры в направлении, противоположном  $\vec{E}$ , в результате чего молекулы приобретают дипольные моменты. При этом созданный дипольный момент  $\vec{P}$  каждой молекулы направлен вдоль поля (рис. 7)

В умеренных полях  $\vec{p} \sim \vec{E}$ , или  $\vec{p} = \alpha \varepsilon_0 \vec{E}$  где  $\alpha$  – поляризуемость молекулы.

*Поляризуемость* – мера того, насколько легко индуцируется у молекулы дипольный момент под действием внешнего поля. Смещение зарядов происходит подобно упругой деформации, то есть, как если бы между зарядами действовали упругие силы. Смещение исчезает вместе с исчезновением поля. Поэтому неполярные молекулы называются «квазиупругими» диполями.

2. *Ориентационная* – поляризация диэлектриков с полярными молекулами,

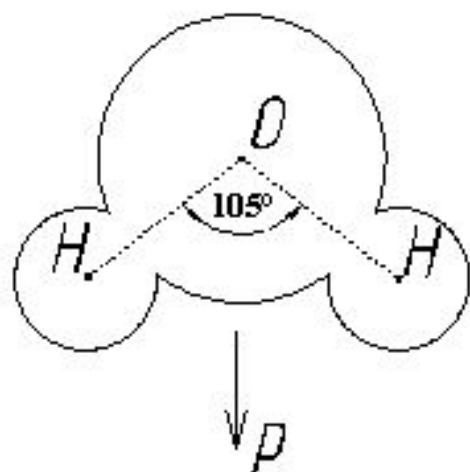


Рис. 8

то есть молекулами, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего поля не совпадают и молекулы уже обладают электрическим дипольным моментом. Это H<sub>2</sub>O, HCl, NH<sub>4</sub>OH, CH<sub>3</sub>OH и т.д. На рис. 8 показано строение полярной молекулы воды. Центры распределения положительных и отрицательных зарядов молекулы смещены и молекула обладает дипольным моментом  $P$ .

*Относительная диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз напряженность внешнего поля больше напряженности поля в диэлектрике. (Это справедливо, если однородный диэлектрик заполняет объем между двумя эквипотенциальными поверхностями или заполняет все пространство, где существует внешнее поле, то есть  $\vec{E} \parallel \vec{E}_o$ .)*

$$\varepsilon = \frac{E_o}{E}$$

## Вектор электрического смещения

Ранее мы сформулировали теорему Гаусса, физический смысл которой в том, что электростатическое поле создается любыми неподвижными электрическими зарядами – и свободными и связанными.

Следовательно, при наличии среды (диэлектрика) поток вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность  $S$  пропорционален алгебраической сумме всей свободных  $q$  и всех связанных  $q'$  зарядов, охватываемых этой поверхностью

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} (q + q')$$

Физическая величина

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

называется *электрическим смещением* (или индукцией).

Тогда  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q$  – теорема Гаусса для  $\vec{D}$ .

*Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность  $S$  равен алгебраической сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью.*

В изотропных диэлектриках связь между  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  выражается более просто.

В этом случае для поляризованности справедливо выражение  $\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$ .

Тогда, учитывая, что  $\varepsilon = 1 + \chi$ , получим

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} (1 + \chi) = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \text{ то есть}$$

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

*Таким образом, в изотропных диэлектриках направление электрического смещения совпадает с направлением вектора результирующей напряженности. В анизотропных диэлектриках направление  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$  могут не совпадать, следовательно, направление  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  могут быть различными.*

Итак, для описания электрического поля вводятся две величины: напряженность  $\vec{E}$  и смещение  $\vec{D}$ . Из этих двух характеристик важнейшей является  $\vec{E}$ . Введение  $\vec{D}$  оправдано тем, что поток  $\vec{D}$  не зависит от среды, от ее диэлектрических свойств, то есть число линий  $\vec{D}$  не меняется при переходе через границу диэлектрика, поэтому теоремой Гаусса для  $\vec{D}$  удобнее пользоваться, когда электрическое поле переходит из вакуума в диэлектрик или из одного диэлектрика в другой.