# Описание поля в диэлектрике

## 1. Строение диэлектриков

Все диэлектрики можно разделить на две группы: *неполярные* и полярные диэлектрики.

Молекулы, у которых центры тяжести, составляющих их положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются *неполярными.* Эти молекулы не имеют собственного дипольного момента, их дипольный момент $\vec{p} = q\vec{l}$ равен нулю. К этой группе относятся прежде всего одноатомные молекулы ( инертные газы, пары металлов и др.) и многоатомные, имеющие симметричное строение. Например, жидкие диэлектрики – бензол, толуол, ксилол и др., твердые диэлектрики – фторопласт, полистирол и др. Строение их молекул показано на рис.11.

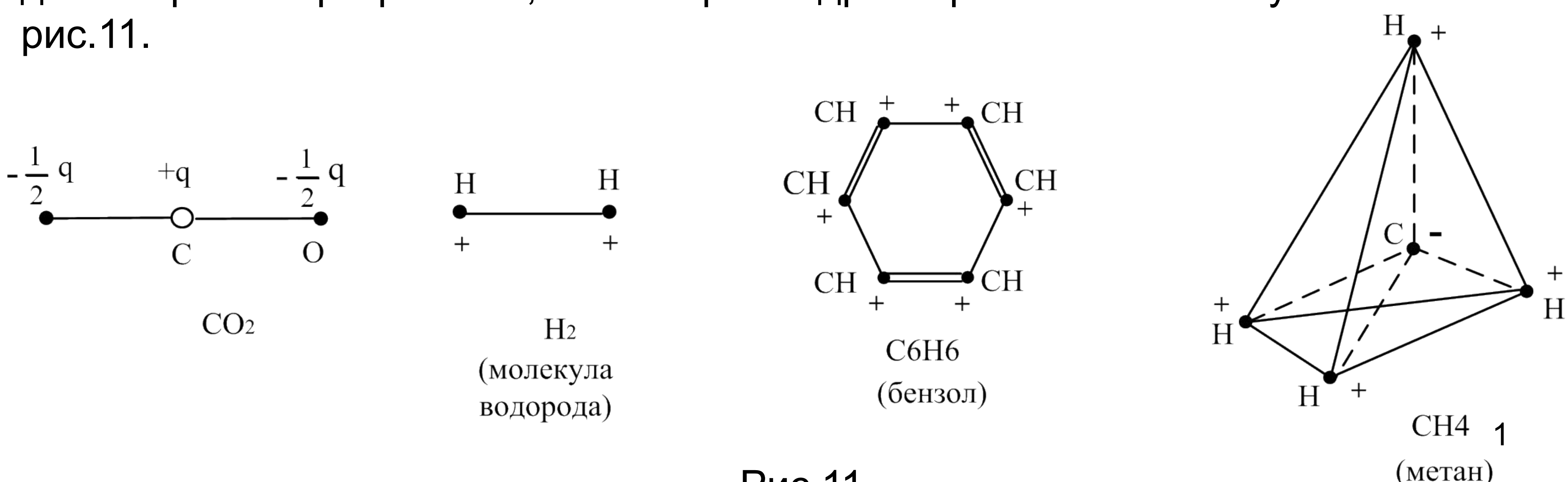


Рис.11

*Полярные диэлектрики* – вещества, у которых молекулы имеют дипольный момент в отсутствие электрического поля (элементарные диполи). Существование элементарных диполей обусловлено асимметрией строения молекул, приводящей к несовпадению центров тяжести положительных и отрицательных зарядов. Если $\vec{\ell}$ – расстояние между центрами тяжести разноименных зарядов, то собственный дипольный момент молекулы $\vec{p} = q\vec{\ell}$. К полярным диэлектрикам относятся: газы – CO, пары воды, пары этилового спирта; жидкости – вода, нитробензол, ацетон, HCl и др., твердые тела – органические полимеры. Строение некоторых молекул показано на рис.12, стрелками указаны направления дипольных моментов.

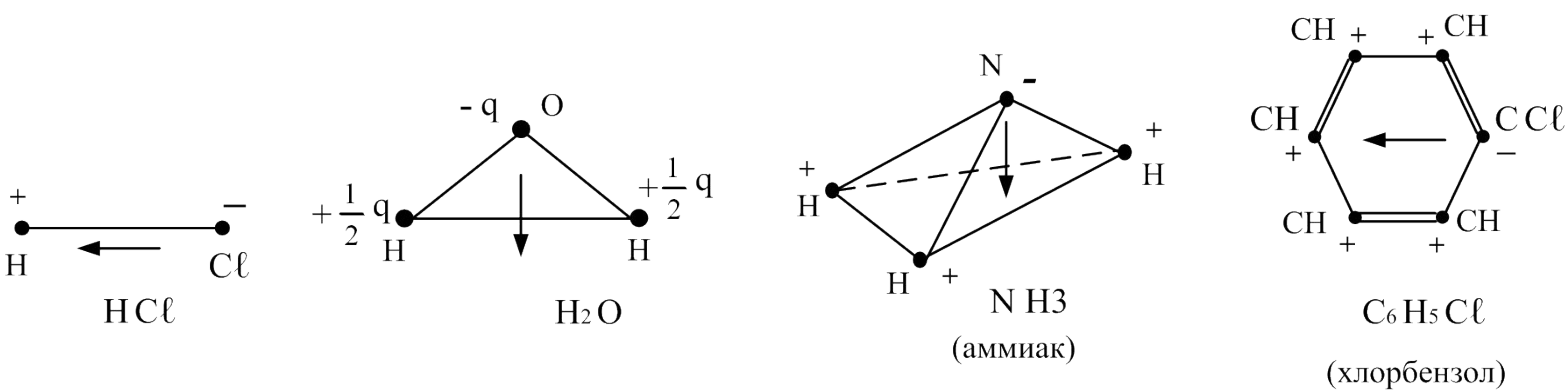


Рис.12

Величины дипольных моментов некоторых полярных молекул приведены в таблице 1.1.

**Таблица 1.1**

| Вещество | $HCl$ | CO | $SO_2$ | $H_2O$ | $CH_3Cl$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $p \cdot 10^{-30}$ Кл·м | 3,6 | 0,33 | 5,3 | 6,2 | 6,25 |

## 2. Поляризация диэлектрика

Поляризация – это состояние диэлектрика, характеризуемое наличием электрического дипольного момента у любого элемента его объема.

Количественной характеристикой поляризации является:

Вектор электрического дипольного момента единицы объема диэлектрика называется **вектором поляризации** или поляризованностью $\vec{P}$ .

Если $d\vec{R}$ - дипольный момент элемента объема $dV$ диэлектрика с непрерывным распределением зарядов, то вектор поляризации в любой его точке

$$\vec{P}(x,y,z) = \frac{d\vec{R}}{dV}$$

Дипольный момент всего образца диэлектрика

$$\vec{R} = \int_V \vec{P} dV$$

Если однородный и изотропный диэлектрик находится в однородном электрическом поле, то его поляризация будет однородной, тогда вектор поляризации

$$\vec{P} = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{p}_i}{\Delta V} \qquad (1)$$

где $\sum_{\Delta V} \vec{p}_i$ – сумма элементарных дипольных моментов в объеме $\Delta V$ .

***PS.*** Поляризация появляется при воздействии электрического поля и исчезает после его удаления, но может в некоторых диэлектриках происходить самопроизвольно (сегнетоэлектрики, пироэлектрики).

В процессе поляризации на поверхности диэлектрика появляется избыточный связанный заряд $\sigma'$. Опыт показывает, что связанный заряд и нормальная компонента вектора поляризации связаны между собой

$$P_n = \sigma' \tag{2}$$

В неполярных диэлектриках в электрическом поле происходит деформация молекул и, в результате смещения положительных и отрицательных зарядов, образуется дипольный момент у каждой молекулы и следовательно у всего диэлектрика

В этом случае электрический момент образовавшегося диполя прямо пропорционален напряженности внешнего поля

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha \vec{E}, \tag{3}$$

где $\alpha -$ поляризуемость молекулы.

Зная поляризуемость молекул, можно определить дипольный электрический момент единицы объема диэлектрика (**вектор поляризации**)

$$\vec{P} = n_0\vec{p} = n_0\varepsilon_0\alpha\vec{E}$$

где $n_0$ – концентрация молекул в диэлектрике. **Диэлектрической восприимчивостью диэлектрика называют величину** $n_0\alpha = \aleph$ .

Диэлектрическая восприимчивость показывает как диэлектрик воспринимает действие электрического поля, на сколько он способен поляризоваться под действием электрического поля

$$\vec{P} = \aleph\varepsilon_o\vec{E} \tag{4}$$

*В слабых электрических полях поляризуемость прямо пропорциональна напряженности поля.*

# 3. Электрическое поле в диэлектриках. Вектор электрического смещении.

Теорема Остроградского-Гаусса для диэлектриков имеет вид:

$$\oint_S (\vec{E}d\vec{s}) = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\sum_{i=1}^{N} q + \sum_{i=1}^{N} q'\right). \qquad (5)$$

В диэлектрике поток вектора $\vec{E}$ через произвольную замкнутую поверхность определяется не только свободными (сторонними) зарядами $q$, но и связанными (поляризационными) зарядами $q'$, находящимися внутри этой поверхности. Эти заряды связаны между собой. Величина заряда $q'$ зависит от заряда $q$. Он влияет на $q$, величину поляризационного заряда. Можно показать, что поляризационный заряд связан с вектором поляризации соотношением

$$-q' = \oint_S \vec{P}d\vec{s} \qquad (6)$$

Знак «-» указывает на то, что избыточный связанный заряд смещается внутрь поверхности S. Этот факт позволяет ввести понятие вектора электрического смещения (индукции , $\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}$ который упрощает запись теоремы Гаусса

$$\oint_S (\vec{D}d\vec{s}) = \sum_{i=1}^{N} q_i \qquad (7)$$

***Теорема Гаусса*** *для вектора* $\vec{D}$ *в интегральной форме для электрического поля в диэлектрике**:*** *<u>поток вектора электрического смещения $\vec{D}$ через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов, заключенных внутри этой поверхности.</u>*

# 4. *Связь векторов $\vec{D}$ и $\vec{E}$ в диэлектриках*

Вектор электрического смещения является функцией напряженности электрического поля $\vec{D} = D(\vec{E})$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \qquad (8)$$

Рассмотрим изотропный диэлектрик в слабых электрических полях

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \aleph \vec{E}$$

Тогда $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \aleph \vec{E}$, обозначив $(1+\aleph) = \varepsilon$, для однородного диэлектрика получаем

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \qquad (9)$$

Коэффициент пропорциональности $\varepsilon$ в линейной зависимости (9) называется **диэлектрической проницаемостью изотропного вещества**.

Он показывает во сколько раз поле в диэлектрике будет меньше, чем в вакууме.

## 5. Граничные условия

***Закономерности преобразования векторов $\vec{D}$ и $\vec{E}$ следующие:***

При переходе через границу раздела двух диэлектриков нормальная компонента вектора $\vec{D}$ не преобразуется:

$$D_{1n} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_{1n} = D_{2n} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_{2n} = const \qquad (10)$$

При переходе через границу раздела двух диэлектриков касательная компонента вектора $\vec{E}$ не преобразуется.

$$E_{1\tau} = \frac{D_{1\tau}}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} = E_{2\tau} = \frac{D_{2\tau}}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} = const \qquad (11)$$

## 6. Проводники в электрическом поле

Свойства проводника, помещённого в электрическое поле:

1. Напряжённость электрического поля внутри проводника всюду равна нулю.
2. Потенциал внутри проводника постоянен.
3. Напряжённость поля вне проводника везде перпендикулярна его поверхности.
4. Вблизи поверхности заряженного проводника напряжённость поля однородна и равна $E_n = \sigma / (\varepsilon \varepsilon_0)$. Оно совпадает с напряжённостью поля между обкладками плоского конденсатора.
5. Теорема Фарадея. Кулоновское поле зарядов, окружённых проводящей оболочкой, экранируется самой оболочкой. Пример.

## 7. Уединённый проводник в электрическом поле. Конденсаторы.

Опыт показывает, что потенциал заряженной поверхности проводника пропорционален величине сообщённого поверхности заряда

$$\varphi = q / C \qquad (12)$$

где C – ёмкость уединённого проводника.

Сравнивая это соотношение и соотношение для потенциала точечного заряда, получим ёмкость уединённого металлического шара:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \qquad (13)$$

где R – радиус шара.

Конденсатором называют систему двух заряженных проводников. По теореме Фарадея их заряды равны и противоположны по знаку.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S / d \qquad (14)$$

Емкость цилиндрического конденсатора:

$$C = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l / \ln(R_2 / R_1) \qquad (15)$$

Емкость сферического конденсатора:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2 / (R_2 - R_1) \qquad (16)$$

## *8. Энергия электрического поля.*

8.1. Энергия конденсатора.

Энергия электрического поля зависит только от состояния системы и не зависит от способа, которым это состояние достигается. Вычислим энергию заряженного конденсатора. Внешним способом будем переносить заряд с одной обкладки на другую. При этом элементарная работа внешних сил $dA_{вн} = \varphi dq$ . Работа сил поля $dA = -dA_{вн}$ . При переносе конечного заряда Q имеем энергию заряженного конденсатора:

$$W = Q^2/(2C) = CU^2/2 = QU/2 \qquad (17)$$

Заменяя U на φ, получим энергию уединённого заряженного проводника.

8.2. Энергия системы зарядов.

Система заряженных тел обладает потенциальной энергией. Для двух точечных зарядов. Один переносим из бесконечности на конечное расстояние к другому: $A_1 = q_1\varphi_2 = q_1 q_2/(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12})$ . Затем наоборот:

$$A_2 = q_2\varphi_1 = q_1 q_2/(4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_{12}) \qquad (18)$$

Они одинаковы.

Обобщение на систему из *N* зарядов:

$$W = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} q_i\varphi_i \qquad (19)$$

где $\varphi_i$ - потенциал создаваемый всеми зарядами, кроме $q_i$ в точке, где находится заряд $q_i$ .

## 8.3. Энергия электрического поля.

Из формулы для энергии плоского конденсатора получим:

$$W = CU^2/2 = \varepsilon\varepsilon_0 S E^2 d^2/(2d) = wV$$

где w – объемная плотность энергии электрического поля (давление) равно

$$w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2/2 \qquad (20)$$

Где локализована энергия электрического поля, и что является её носителем: заряды или поле?

**Накопленный человечеством опыт показывает, что энергия электрического поля заключена в его силовых линиях!!!**