

Глава VI

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

§ 6.1. Дипольные моменты молекул диэлектрика

1. В этой главе будут рассмотрены электрические свойства непроводящих веществ — диэлектриков.

Согласно представлениям классической физики, диэлектрики отличаются от проводников тем, что при не слишком высоких температурах и в отсутствие очень сильных электрических полей в них нет носителей заряда. В гл. XIII показано, что трактовка свойств кристаллических диэлектриков в современной физике существенно отличается от указанной выше.

2. Каждая молекула (или атом) диэлектрика содержит положительно заряженные ядра и электроны, движущиеся вокруг ядер. Суммарный положительный заряд всех ядер в молекуле равен абсолютной величине заряда всех электронов, так что молекула в целом электрически нейтральна. Однако это не означает, что молекулы не имеют электрических свойств. Заменяв все положительные заряды ядер молекулы одним суммарным зарядом $+q$, находящимся в центре тяжести положительных зарядов, а все отрицательные заряды — одним суммарным отрицательным зарядом $-q$, расположенным в центре тяжести отрицательных зарядов, можно в первом приближении рассматривать молекулу диэлектрика как диполь, состоящий из зарядов $+q$ и $-q$. Как известно из § 2.2, такой диполь имеет электрический момент \mathbf{p}_e и создает электрическое поле. Таким образом, молекула вещества может создавать в окружающем пространстве электрическое поле.

3. В молекулах некоторых диэлектриков (H_2 , N_2 , CCl_4 , углеводороды и др.) электроны расположены симметрично вокруг ядер. В этих молекулах центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают и дипольный момент молекулы $\mathbf{p}_e = 0$. Поэтому молекулы таких диэлектриков называются **неполярными**.

Если неполярную молекулу диэлектрика поместить во внешнее электростатическое поле, то в ней индуцируется (наводится) дипольный момент \mathbf{p}_e . Рассмотрим, например, что произойдет с атомом водорода, помещенным в электростатическое поле. Для простоты будем считать, что электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите радиуса r (рис. 6.1, а). Если отсутствует внешнее поле, то на электрон действует одна лишь электрическая сила \mathbf{F}_e его притяжения к ядру, численно равная, согласно формуле (1.8), $F_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$. Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение, численно равное $(v^2/r) = \omega^2 r$, поэтому

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m\omega^2 r, \quad (6.1)$$

где m — масса электрона, ω — угловая скорость его движения по орбите. Из (6.1) легко определить радиус орбиты электрона.

Пусть на атом водорода действует внешнее электрическое поле, вектор \mathbf{E} напряженности которого перпендикулярен плоскости орбиты электрона. Под влиянием поля орбита электрона деформируется. В первом приближении можно считать, что эта деформация заключается в смещении плоскости орбиты электрона на малое расстояние

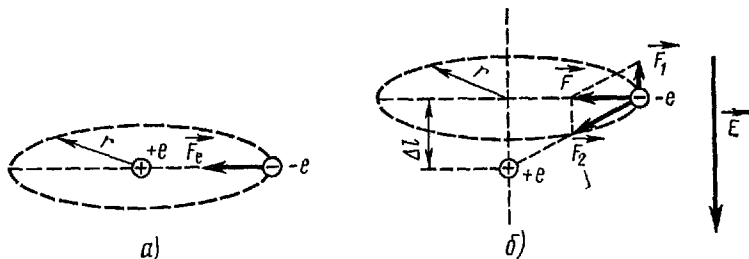


Рис. 6.1

$\Delta l (\Delta l \ll r)$ в направлении, противоположном направлению \mathbf{E} , причем радиус r орбиты и угловая скорость ω электрона не изменяются (рис. 6.1; б). Теперь роль центростремительной силы будет играть равнодействующая \mathbf{F} сил, приложенных к электрону со стороны внешнего электрического поля (\mathbf{F}_1) и со стороны ядра (\mathbf{F}_2): $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$, где $F = m\omega^2 r$ и $F_1 = eE$. Из рис. 6.1, б следует, что

$$\frac{\Delta l}{r} = \frac{F_1}{F} = \frac{eE}{m\omega^2 r}, \text{ откуда } \Delta l = eE/m\omega^2.$$

Смещение орбиты электрона, а следовательно, и центра тяжести его заряда по отношению к ядру под влиянием внешнего электрического поля пропорционально напряженности этого поля. Смещение Δl аналогично упругой деформации, поэтому диполь, возникший в атоме водорода, называют упругим диполем. Электрический момент ρ_e упругого диполя численно равен

$$\rho_e = e\Delta l = e^2 E/m\omega^2,$$

или, если использовать формулу (6.1),

$$\rho_e = 4\pi\epsilon_0 r^3 E = \epsilon_0 \alpha E.$$

где $\alpha = 4\pi r^3$ — множитель, пропорциональный третьей степени радиуса орбиты, т.е. объему атома, и называемый **поляризуемостью атома**. Результат, полученный в этом примере, имеет общее значение. Индуцированный дипольный момент неполярной молекулы всегда пропорционален напряженности внешнего электрического поля, причем поляризуемость этой молекулы зависит только от ее объема. Вектор ρ_e совпадает по направлению с вектором \mathbf{E} напряженности внешнего электрического поля:

$$\rho_e = \epsilon_0 \alpha \mathbf{E}. \quad (6.2)$$

4. Большую группу диэлектриков составляют вещества, в молекулах которых электроны расположены несимметрично относительно ядер. В таких молекулах центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают, и молекулы этих диэлектриков характеризуются наличием постоянного дипольного электрического момента \mathbf{p}_e , определяемого их структурой. Молекулы указанного типа называются **полярными**. Диэлектриками с полярными молекулами являются H_2O , NH_3 , HCl , CH_3Cl и другие вещества. Наличие постоянного дипольного момента \mathbf{p}_e молекул этой группы диэлектриков позволяет приблизительно считать, что такие молекулы ведут себя подобно жесткому диполю, расстояние l между зарядами $+q$ и $-q$ которого постоянно и не зависит от того, действует на него внешнее электрическое поле или нет. Поэтому формула (6.2) к полярным диэлектрикам неприменима. Однако это не означает, что внешнее электростатическое поле не оказывает существенного влияния на жесткий диполь, помещенный в это поле.

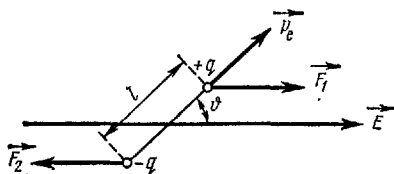


Рис. 6.2

но жесткому диполю, расстояние l между зарядами $+q$ и $-q$ которого постоянно и не зависит от того, действует на него внешнее электрическое поле или нет. Поэтому формула (6.2) к полярным диэлектрикам неприменима. Однако это не означает, что внешнее электростатическое поле не оказывает существенного влияния на жесткий диполь, помещенный в это поле.

5. Предположим, что в однородное электростатическое поле помещен жесткий диполь так, что вектор \mathbf{p}_e его дипольного момента направлен под углом ϑ к вектору напряженности \mathbf{E} внешнего поля (рис. 6.2). Как видно из рисунка, на диполь действует пара сил: $\mathbf{F}_1 = q\mathbf{E}$ и $\mathbf{F}_2 = -q\mathbf{E}$. Момент \mathbf{M} этой пары сил численно равен

$$M = qEl \sin \vartheta = p_e E \sin \vartheta. \quad (6.3)$$

Вектор момента \mathbf{M} равен векторному произведению векторов:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_e \mathbf{E}]. \quad (6.3')$$

Вектор \mathbf{M} направлен перпендикулярно плоскости, проходящей через векторы \mathbf{p}_e и \mathbf{E} (плоскость чертежа), причем из конца \mathbf{M} вращение от \mathbf{p}_e к \mathbf{E} по кратчайшему пути видно происходящим против часовой стрелки. В примере, изображенном на рис. 6.2, вектор \mathbf{M} направлен от нас за чертеж. Момент \mathbf{M} пары сил стремится повернуть диполь и установить его так, чтобы направления векторов \mathbf{p}_e и \mathbf{E} совпадали. Если пренебречь инерцией диполя, то необходимо считать, что после установления оси диполя вдоль поля он остановится. При этом силы, действующие на оба заряда жесткого диполя, равны по абсолютному значению и направлены по одной прямой в противоположные стороны. Они стремятся изменить расстояние l между зарядами $-q$ и $+q$. Если диполь жесткий, то действие этих сил должно быть компенсировано внутримолекулярными силами связи. Однако, как показывает опыт, действие внешнего поля всегда приводит к некоторой деформации молекулы и появлению индуцированного дипольного момента (см. § 6.2).

6. Предположим, что жесткий диполь находится в неоднородном электрическом поле, так что на длине l диполя происходит заметное

изменение напряженности E поля. В этом случае помимо вращающего момента на диполь будет действовать сила F , равная векторной сумме сил F_1 и F_2 , приложенных к обоим зарядам диполя:

$$F = F_1 + F_2 = q(E_1 - E_2), \quad (6.4)$$

где E_1 и E_2 — напряженности поля в тех точках, в которых находятся, соответственно, положительный и отрицательный заряды диполя. По теореме о среднем,

$$E_1 - E_2 = l(\partial E/\partial l),$$

где l — длина диполя, а производная $\partial E/\partial l$ характеризует быстроту изменения вектора на единицу длины вдоль оси диполя. Следовательно,

$$F = ql \frac{\partial E}{\partial l} = p_e \frac{\partial E}{\partial l}. \quad (6.5)$$

Под действием силы F свободный диполь стремится переместиться в область наибольшей напряженности поля. Этим объясняется притяжение к заряженному телу легких предметов (небольших кусочков бумаги, частиц пыли, дыма и т. д.): под влиянием поля на них появляются индуцированные электрические заряды и эти предметы ведут себя аналогично диполям.

В векторном анализе доказано, что выражение (6.5) можно представить в форме

$$F = p_{ex} \frac{\partial E}{\partial x} + p_{ey} \frac{\partial E}{\partial y} + p_{ez} \frac{\partial E}{\partial z}, \quad (6.5')$$

где p_{ex} , p_{ey} , p_{ez} — проекции вектора p_e на оси декартовой системы координат. В частности, для простейшего неоднородного поля, вектор E которого всюду направлен вдоль оси X и зависит только от координаты x ($E_x = E(x)$, $E_y = E_z = 0$ и $E = E_x i$),

$$F = p_{ex} \frac{dE_x}{dx} i.$$

Силу, действующую на жесткий диполь в неоднородном электрическом поле, можно также выразить в виде

$$F = \text{grad}(p_e E). \quad (6.5'')$$

§ 6.2. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации

1. При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит так называемая поляризация диэлектрика. Для рассмотрения этого явления выясним, как ведет себя совокупность молекул-диполей, помещенных в электрическое поле.

Если диэлектрик с полярными молекулами находится во внешнем электрическом поле, то вследствие беспорядочного теплового движения молекул векторы их дипольных моментов