

ризации $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{p}$, увеличивает на такую же величину энергию, заключенную в самой молекуле.

Посмотрим, какое количество энергии, запасенной в диэлектрике, можно объяснить таким образом. Если в единице объема находится N молекул, то поляризация $\mathbf{P} = N\mathbf{p}$. Если \mathbf{P} меняется на величину $d\mathbf{P}$, то произведение $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{P}$ представляет собой увеличение внутренней энергии молекул в 1 см^3 . Но так как $\mathbf{P} = (\epsilon - 1) \mathbf{E} / 4\pi$, то

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{P} = \frac{1}{4\pi} (\epsilon - 1) \mathbf{E} \cdot d\mathbf{E} = \frac{1}{8\pi} (\epsilon - 1) d(E^2). \quad (76)$$

Следовательно, из $\epsilon E^2 / 8\pi \text{ эрг}$, которые были запасены в диэлектрике, $(\epsilon - 1) E^2 / 8\pi$ можно отнести за счет увеличенной внутренней энергии поляризованных молекул. Остаток $E^2 / 8\pi$ является энергией, запасенной в поле вакуума.

9.15. Диэлектрики, состоящие из полярных молекул

Молекулы с собственными дипольными моментами, называемые полярными молекулами, стремятся расположиться в электрическом поле так, чтобы векторы их дипольных моментов совпали по направлению с \mathbf{E} . Подходящей механической моделью таких молекул являются не два заряда на концах пружины, а стержень с двумя зарядами, прикрепленными к его концам (рис. 9.35). Если такой стержень образует угол θ с направлением поля, то на него действует вращающий момент, равный $E qs \sin \theta$. Работа, совершенная на угловом перемещении $d\theta$, равна (вращающий момент \times угловое перемещение), или $E qs \sin \theta d\theta$. Ее можно также выразить через векторный дипольный момент \mathbf{p} с модулем qs и приращение $d\mathbf{p}$, возникающее в результате поворота молекулы на угол $d\theta$. Из графика ясно, что модуль $d\mathbf{p}$ равен $p d\theta$, а направление его таково, что $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{p} = E dp \sin \theta$.

Таким образом, $dW = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{p}$; как и следовало ожидать, это согласуется с уравнением (75).

Если изолированная полярная молекула в момент включения электрического поля \mathbf{E} занимает положение, указанное на рис. 9.35, то она начнет поворачиваться, стремясь расположиться параллельно полю, но, пройдя положение равновесия, будет продолжать колебаться подобно маятнику, поскольку сообщенная ей энергия больше ни на что не расходуется. Реальная молекула, однако, окружена другими молекулами и может обмениваться с ними энергией. Это создает «трение», способствующее затуханию колебаний. По-видимому, такое явление присуще всем полярным молекулам вещества,

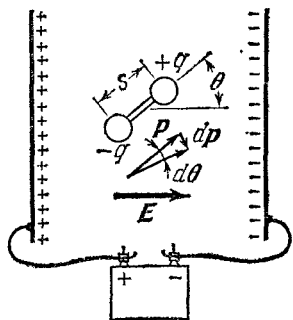


Рис. 9.35. Полярная молекула похожа на два заряда, прикрепленных к концам стержня. Поле \mathbf{E} приводит к появлению на молекуле вращающего момента.

располагающимся параллельно любому приложенному полю, даже слабому. При абсолютном нуле наблюдалось бы то же самое, если допустить, что там еще возможно вращение. При любой температуре выше абсолютного нуля хаотичное тепловое движение, интенсивность которого пропорциональна температуре, препятствует установлению векторов дипольных моментов вдоль поля. Приложенное поле дает молекулярному диполю энергетическую возможность расположиться параллельно полю, но, непрерывно толкаемый своими соседями, диполь может принимать правильное направление не намного чаще, чем неправильное. В воде, например, поле в 1000 в/см обеспечивает поляризацию, эквивалентную правильному расположению только одной молекулы из трех тысяч. Но даже такая поляризация гораздо эффективней поляризации неполярного вещества в таком же поле, и это объясняет чрезвычайно большую диэлектрическую постоянную воды. Поляризация в полярном диэлектрике обычно пропорциональна приложенному электрическому полю и обратно пропорциональна абсолютной температуре.

9.16. Поляризация в переменных полях

До сего времени мы занимались только электростатическими полями в веществе. Необходимо рассмотреть действия электрических полей, меняющихся во времени, подобно полю конденсатора, помещенного в цепь переменного тока. Важно знать, последуют ли изменения поляризации за изменениями поля? Останется ли отношение \mathbf{P} к \mathbf{E} в любой момент времени таким же, как в статическом электрическом поле? При очень медленных изменениях мы не должны ожидать никакой разницы, но, как всегда, критерий медленности зависит от рассматриваемого физического процесса. Оказывается, что индуцированная поляризация и ориентация жестких диполей являются двумя процессами с совершенно различным временем релаксации.

Индуцированная поляризация атомов и молекул происходит за счет деформации электронных орбит. В процессе принимает участие маленькая масса, и структура является очень жесткой; свободные частоты ее колебаний чрезвычайно высоки. Иначе говоря, движение электронов в атомах и молекулах характеризуется периодами порядка 10^{-16} сек — это соответствует периоду волны видимого света. Для атома 10^{-14} сек является длительным промежуток времени. За такое время нетрудно изменить его электронную структуру. Поэтому строго неполярные вещества ведут себя практически одинаково, начиная от «постоянного тока» до частот видимого света. Поляризация следует за полем и восприимчивость $\chi_e = P/E$ не зависит от частоты. Что произойдет, когда частота изменения поля приблизится к некоторой свободной частоте электронной структуры? Решение этого интересного вопроса мы должны отложить до следующего тома. (Одним из результатов является радуга!)