

## ГЛАВА III

### ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

#### § 19. Дипольная и электронная поляризация диэлектриков. Сегнетоэлектрики

В первом томе при изложении вопроса о природе молекулярных сил уже были сообщены некоторые сведения об электрических свойствах молекул (о дипольных моментах полярных молекул и о поляризуемости неполярных молекул; т. I, § 130). Напомним сказанное там и вслед за этим рассмотрим, как влияют электрические свойства молекул на поле в диэлектрике.

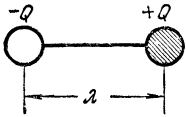


Рис. 42. Электрический момент диполя  $\mu_e = Q \lambda$ .

В каждой молекуле диэлектрика находится одновременно и положительное и отрицательное электричество в одинаковых количествах. Можно сказать поэтому, что молекула диэлектрика содержит в себе парные электрические заряды, является *электрическим диполем*. Произведение величины заряда  $Q$  на расстояние  $\lambda$  между зарядами называют *моментом диполя*  $\mu_e$  (рис. 42 и стр. 21—22). Обычно момент  $\mu_e$  диполя рассматривают как вектор, направленный по оси диполя в сторону положительного заряда. Следует отметить, что под «расстоянием между зарядами» в молекулярном диполе следует понимать расстояние между центрами размещения положительных и отрицательных зарядов, причем эти «центры размещения» определяются так же, как и центры масс. Для молекул, построенных из ионов, характерны значения дипольных моментов порядка  $10^{-18}$ — $10^{-17}$  эл.-ст. ед. количества электричества  $\cdot$  см (заряд электрона  $4,8 \cdot 10^{-10}$  эл.-ст. ед., а молекулярные расстояния имеют порядок  $10^{-8}$  см).

Ориентировка молекулярных электрических диполей настолько разнообразна, что диэлектрик в своем обыкновенном состоянии не обнаруживает заметной электризации. На рис. 43 показано подобное распределение парных зарядов в диэлектрике, причем схематично изображены молекулы диэлектрика: черные и белые кружки обозначают соответственно положительные и отрицательные заряды.

Если теперь приблизить к такому изолятору наэлектризованное тело, то все противоположные ему по знаку заряды притянутся им, а одноименные оттолкнутся. Хотя в диэлектрике и не происходит полного разделения зарядов, как в проводнике, но все же они способны несколько сместиться, оставаясь внутри молекулы связанными друг с другом, а, кроме того, сами молекулы могут повернуться. При этом заряд, противоположный заряду влияющего тела, станет немного ближе к этому последнему, тогда как одноименный заряд отодвинется дальше от влияющего тела. Такое смещение зарядов приводит диэлектрик в особое состояние, которое

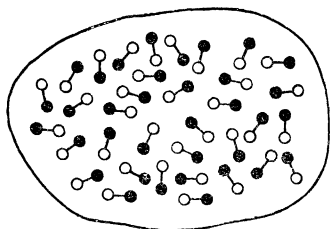


Рис. 43. Парные заряды в диэлектрике. При отсутствии поля молекулярные диполи ориентированы хаотически.

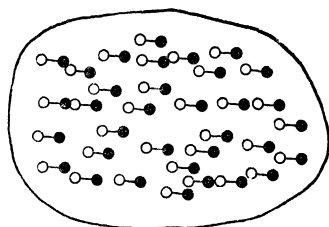


Рис. 44. Поляризация диэлектрика. Диполи ориентируются под действием электрической силы.

носит название *поляризации* диэлектрика и состоит в *определенной ориентировке молекулярных диполей* (рис. 44) и в *увеличении момента диполей*.

Конечно, вследствие постоянного теплового движения молекул и столкновения их друг с другом ориентировка молекулярных диполей будет постоянно сбиваться, но если температура не слишком велика, то все же в среднем итоге окажется некоторая средняя ориентировка, некоторая средняя поляризация диэлектрика и некоторая средняя электризация его поверхности.

Различают «жесткие» и «мягкие» диполи. Если под действием электрической силы молекулярные диполи только ориентируются, но момент их не возрастает (не происходит смещения внутримолекулярных электрических зарядов), то такие диполи называют *жесткими*. Если момент диполя под действием электрической силы возрастает, то такой диполь называют *мягким*, или *квазиупругим*.

Вещества, молекулы которых от природы (в отсутствие электрических сил) представляют собой электрические диполи, называют *полярными веществами*. Типичными представителями таких веществ являются вода, аммиак ( $\text{NH}_3$ ), эфир, ацетон.

Наряду с полярными диэлектриками имеются и *неполярные диэлектрики*, молекулы которых (вследствие симметричного распределения внутримолекулярных зарядов), вообще говоря, не являются

диполями, но, однако, становятся диполями, когда они находятся под действием электрической силы. Электрическая сила раздвигает внутримолекулярные электрические заряды так, что центр положительных зарядов молекулы оказывается удаленным на некоторое (конечно, весьма малое) расстояние  $\lambda$  от центра отрицательных зарядов молекулы (рис. 45). Электрический дипольный момент такой молекулы тем более велик, чем больше указанное расстояние  $\lambda$  между центрами ее положительных и отрицательных зарядов. Это расстояние возрастает при увеличении действующей на молекулу электрической силы, поэтому и электрический момент  $Q\lambda$  у такого

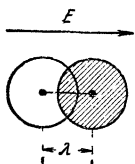


Рис. 45. Электрическая поляризация неполярных молекул.

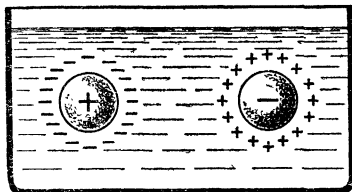


Рис. 46. Поляризация среды уменьшает силу взаимодействия между зарядами в  $\epsilon$  раз.

мягкого диполя возрастает при увеличении действующей на молекулу электрической силы; в первом приближении считают, что *электрический момент мягкого диполя пропорционален напряженности поля в диэлектрике*:

$$\mu_e = Q\lambda = \alpha E. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  называют *поляризуемостью молекулы*. Он тем более велик, чем легче происходит смещение электронов в молекулах. Поэтому этот вид поляризации диэлектриков называют *электронной поляризацией* в отличие от *дипольной поляризации*, проявляющейся в эффекте ориентации жестких диполей.

Совокупным влиянием дипольной и электронной поляризации объясняется ослабляющее действие диэлектрической среды на силу взаимодействия электрических зарядов.

Представим себе, что два противоположно наэлектризованных шарика взаимодействуют друг с другом в пустоте, а затем мы погружаем их в изолирующую жидкость, например в керосин. Сила взаимодействия между шариками при погружении в керосин уменьшается приблизительно вдвое против той силы, которая наблюдалась между ними в воздухе или в пустоте (диэлектрическая постоянная керосина  $\approx 2$ ). Уменьшение силы взаимодействия между шариками происходит оттого, что керосин поляризуется. У поверхности положительно заряженного шарика сосредоточиваются отрицательные заряды молекулярных диполей керосина (рис. 46), а около от-

рицательно заряженного шарика — положительные заряды. Легко видеть, что появившаяся в керосине поляризация должна уменьшить силу взаимодействия шариков. Это уменьшение силы взаимодействия вследствие поляризации среды формально учитывается в законе Кулона введением диэлектрической постоянной среды.

Численное значение диэлектрической постоянной вещества определяется электрическими свойствами молекул и числом их в единице объема. Чем больше полярность и поляризуемость вещества, тем более велика диэлектрическая постоянная. Если, однако, число молекул в единице объема мало, то эффект поляризации сказывается слабо, поэтому диэлектрическая постоянная всех газов очень близка к единице:

ε	ε
Гелий . . . . . 1,000074	Воздух . . . . . 1,00059
Водород . . . . . 1,00026	Пары воды . . . . . 1,0078
Кислород . . . . . 1,00055	Углекислота . . . . . 1,00098
Азот . . . . . 1,00061	Пары этилового спирта 1,0065

Эти данные (кроме паров воды и спирта) относятся к газам при нормальном атмосферном давлении и при температуре 0°. Диэлектрическая постоянная убывает с температурой (рис. 47) и растет

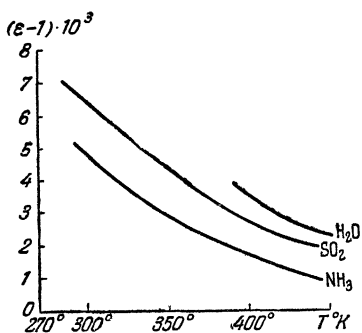


Рис. 47. Зависимость диэлектрической постоянной газов от температуры.

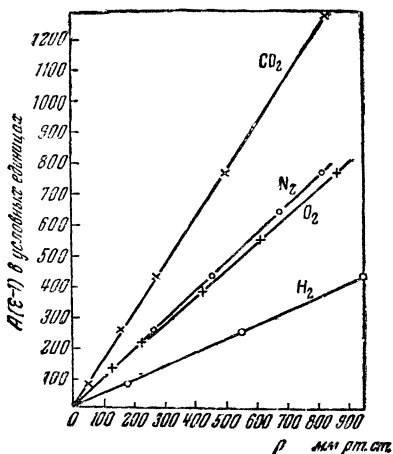


Рис. 48. Зависимость величины  $(\epsilon - 1)$  для газов от давления.  $A$  — постоянная величина.

вместе с увеличением давления газа; величина  $(\epsilon - 1)$  приблизительно пропорциональна плотности газа (рис. 48).

Твердые изоляторы имеют диэлектрическую постоянную, сильно зависящую от их молекулярного состава и структуры:

ε		ε	
Бумага . . . . .	около 2	Дерево . . . . .	от 2 до 8
Эбонит, сургуч, янтарь . . . . .	от 2 до 3	Слюда . . . . .	от 6 до 8
Парафин . . . . .	около 2	Стекло обыкновенное . . . . .	от 4 до 6
Сера . . . . .	около 4	» оптическое (флинт) . . . . .	до 10
Гуттаперча . . . . .	около 4	Фарфор . . . . .	6
		Мрамор . . . . .	8

Диэлектрическая постоянная вещества в жидком состоянии обычно бывает больше, чем диэлектрическая постоянная того же вещества в твердом состоянии:

ε		ε	
Лед . . . . .	2,85	Уксусная кислота твердая . . . . .	4,1
Вода . . . . .	81,7	» » жидкая . . . . .	6,4
Этиловый спирт твердый . . . . .	3,1	Синильная кислота твердая . . . . .	6,4
» » жидкий . . . . .	25,7	» » жидкая . . . . .	95,0
Аммиак твердый . . . . .	4,0	Бензол-ацетон твердый . . . . .	2,8
» жидкий . . . . .	16,2	» жидкий . . . . .	15,4

С повышением температуры диэлектрическая постоянная жидких веществ уменьшается. На рис. 49 показано изменение диэлектрической постоянной этилового эфира в зависимости от температуры. Точка резкого возрастания диэлектрической постоянной соответствует температуре плавления.

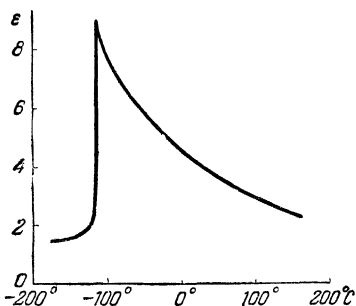


Рис. 49. Диэлектрическая постоянная этилового эфира как функция температуры.

То, что в твердом состоянии большинство тел имеет диэлектрическую постоянную меньшую, чем в жидком, объясняется отсутствием или затрудненностью в твердом состоянии «ориентационного эффекта» (т. е. поворота дипольных молекул). По той же причине диэлектрическая постоянная твердых тел, как правило, мало зависит от температуры. Различие между полярными и неполярными веществами в отношении величины диэлектрической постоянной сильнее всего сказывается у жидко-

стей. Тепловое движение расстраивает ориентацию дипольных молекул, создаваемую электрическим полем. Поэтому при повышении температуры диэлектрическая постоянная полярных жидкостей существенно уменьшается. Диэлектрическая постоянная неполярных жидкостей мало зависит от температуры. На рис. 50 показан характерный для большинства веществ ход кривых, определяющих зависимость диэлектрической постоянной от температуры. Имеются вещества с громадным значением диэлектрической

постоянной. Типичным представителем этой группы веществ является *сегнетова соль*, представляющая собой двойную натрокалиевую соль винной кислоты  $\text{NaKC}_4\text{H}_6\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ; при комнатной температуре диэлектрическая постоянная сегнетовой соли достигает значения 10 000. Аномально большую диэлектрическую постоянную сегнетова соль имеет при температурах выше  $-20^\circ\text{C}$  и ниже  $+25^\circ\text{C}$ ; вне этого интервала температур диэлектрические свойства сегнетовой соли сходны со свойствами обычных диэлектриков (рис. 51). Кристаллы фосфата калия  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  имеют аномально большую диэлектрическую постоянную в интервале температур от  $-190$  до  $-130^\circ\text{C}$ .

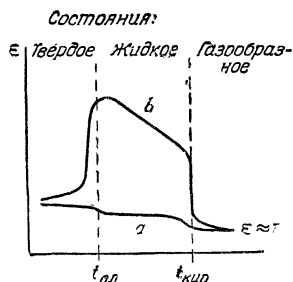


Рис. 50. Зависимость диэлектрической постоянной от температуры для неполярных (а) и полярных (б) веществ.

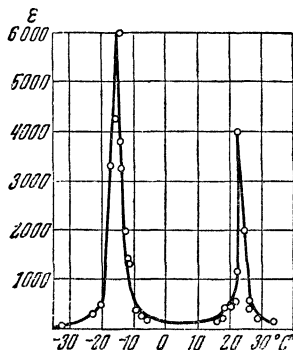


Рис. 51. Диэлектрическая постоянная сегнетовой соли в зависимости от температуры для слабых полей.

Все вещества, имеющие аномально большую диэлектрическую постоянную, носят название *сегнетоэлектриков*. В отношении электрической поляризации сегнетоэлектрики обнаруживают полное сходство с намагничиванием железа: подобно железу, в котором наблюдаются (поясненные в § 63) явления остаточного намагничивания и магнитного гистерезиса, сегнетоэлектрики обнаруживают остаточную электрическую поляризацию и электрический гистерезис.

Диэлектрические свойства сегнетовой соли были обстоятельно изучены советскими учеными И. В. Курчатовым, П. П. Кобеко и др. в 1930—1934 гг. В 1944 г. советские физики Б. М. Вул и И. М. Гольдман обнаружили сегнетоэлектрические свойства у титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ . Диэлектрическая постоянная титаната бария меньше, чем у сегнетовой соли и у фосфата калия, но все же достигает громадных значений 1000—2000 и при наличии некоторых примесей даже 8000 при  $20^\circ\text{C}$ . Практически титанат бария наиболее удобен для применения, так как сегнетоэлектрические свойства титаната бария сохраняются в широком интервале температур.

В меньшей мере сегнетоэлектрическими свойствами обладают и некоторые другие вещества:  $\text{NaNbO}_3$ ,  $\text{PbZrO}_3$  и т. д.