

## К вопросу об изменении электропроводности жидких диэлектриков с течением времени.

Причины изменения электропроводности жидких диэлектриков весьма разнообразны. Большую роль играют всевозможные примеси, из которых некоторые неуловимы не только количественно, но и качественно.

Здесь мы разберем теоретически случай весьма чистого диэлектрика, в котором существуют ионы одного какого-нибудь типа.

Если диэлектрик помещен в сосуд без металлических электродов, то изменение числа ионов  $n$  в одном  $\text{см}^3$  происходит по уравнению:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2, \quad (1)$$

где  $q$  — число ионов одного какого-либо знака, образующихся в  $1 \text{ см}^3$ ,  $n$  — число ионов одного знака, существующих в данный момент в  $1 \text{ см}^3$ , и  $\alpha$  коэффициент рекомбинации. Уравнение (1) относится к тому случаю, когда числа положительных и отрицательных ионов одинаковы, т. е. диэлектрик не заряжен.

Ионы в жидком диэлектрике, налитом в металлический сосуд или в измерительный конденсатор с металлическими электродами, распределены не равномерно и их число постепенно убывает, пока не установится стационарное состояние. Вследствие присутствия металлических частей возникает различие в концентрации и происходит диффузия ионов. Приближаясь к электроду, ион вызывает в нем индуцированный заряд, притягивается к нему и, отдавая заряд, обращается в нейтральную молекулу. Если ион представляет из себя конгломерат или группу молекул, собравшихся около заряженного ядра, то после нейтрализации заряда ион перестает существовать, как отдельный индивидуум, и молекулы, его образовавшие, расходятся по всему объему жидкости. Вследствие притяжения число ионов вблизи металлической поверхности быстро убывает и около самой поверхности концентрация ионов всегда равна нулю. Распределение ионов в жидком диэлектрике между двумя металлическими электродами таково же, как распределение капелек водяного тумана между двумя поверхностями из гигроскопического вещества, напр. из серной кислоты, хлористого кальция, фосфорного ангидрида и т. п.

Если концентрация  $n$  ионов есть функция точки  $(x, y, z)$ , то изменение ионов вследствие диффузии происходит согласно уравнению:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \right),$$

где  $D$  коэффициент диффузии, или по уравнению:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (2)$$

если концентрация зависит только от  $x$ .

Наконец нам остается установить выражение для изменения числа ионов с течением времени для того случая, когда к электродам приложена некоторая разность потенциалов  $V$ , которая создает внутри диэлектрика электрическое поле и вызывает движение ионов.

Пусть электроды параллельны друг другу и находятся на расстоянии  $d$ . Под влиянием напряжения  $V/d$  в диэлектрике возникает ток, плотность  $j$  которого, выражается через:

$$j = e (K_1 + K_2) n \frac{V}{d},$$

где  $e$  элементарный заряд,  $K_1$  и  $K_2$  подвижности положительных и отрицательных ионов. Число ионов, уносимым током к электродам из столба диэлектрика длиной  $d$  см и площадью поперечного сечения в  $1 \text{ см}^2$  равно:

$$(K_1 + K_2) n \frac{V}{d},$$

а число ионов, удаляемых током из единицы объема в течение одной секунды, равняется:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (K_1 + K_2) n \frac{V}{d^2} \quad (3)$$

следовательно, при одновременном действии ионизации, рекомбинации, диффузии и электрического тока, уравнение для изменения числа ионов принимает вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - \alpha n^2 + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - (K_1 + K_2) n \frac{V}{d^2} \quad (4)$$

Рассмотрим частные случаи интегрирования уравнения (4).

Случай I. До опыта жидкий диэлектрик или совершенно не подвергался действию напряжения электрического поля или последнее было незначительно, затем к электродам сразу прикладывается высокая разность потенциалов, которая и является главным фактором, удаляющим ионы из жидкости. Пренебрегая рекомбинацией и диффузией ионов, т. е. полагая  $\alpha = 0$  и  $D = 0$ , имеем:

$$\frac{dn}{dt} = q - (K_1 + K_2) \frac{V}{d^2} n \quad (5)$$

или, обозначая

$$(K_1 + K_2) \frac{V}{d^2} = \beta,$$

$$\frac{dn}{dt} = q - \beta n.$$

Интеграл последнего уравнения напишется в виде:

$$n = \frac{q}{\beta} + C e^{-\beta t},$$

где  $C$  произвольная постоянная.

Умножая обе части последнего выражения на  $\epsilon d$ , переходя отчасти к прежним обозначениям и вводя новую постоянную

$$C_1 = C \epsilon (K_1 + K_2) \frac{V}{d},$$

получаем

$$\epsilon (K_1 + K_2) \frac{V}{d} n = \epsilon q d + C_1 e^{-\beta t} \quad (6)$$

Принимая во внимание, что плотность тока:

$$j = \varepsilon(K_1 + K_2) \frac{V}{d} n$$

и плотность тока насыщения:

$$J = \varepsilon q d,$$

из (6) получаем:

$$j = J + C_1 e^{-\beta t}$$

Если плотность тока в начальный момент  $t=0$  обозначим через  $j_0$  и на основании этого определим постоянную  $C_1$ , то окончательно имеем:

$$j = J + (j_0 - J) e^{-(K_1 + K_2) \frac{V}{d^2} t}, \quad (7)$$

откуда видно, что при  $t = \infty$  ток получает насыщение ( $j = J$ ).

Следовательно, в случае перехода от низкого напряжения к достаточно высокому электрический ток, состоящий в начале из двух компонентов, из которых один постоянен, а другой убывает с течением времени, через бесконечно большой промежуток времени обращается в ток насыщения.

Случай II. Диэлектрик долгое время подвергается действию высокого напряжения, которое затем в момент  $t=0$  заменяется столь низким напряжением, что переносом ионов током можно пренебречь сравнительно с их уничтожением вследствие рекомбинации. Кроме того мы будем пренебрегать диффузией ионов. В этом случае уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2.$$

Интеграл последнего уравнения имеет вид:

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha} \frac{1 - e^{-2\sqrt{q\alpha}t}}{1 + e^{-2\sqrt{q\alpha}t}}}$$

Плотность тока в момент  $t$  выражается через:

$$j = j_\infty \frac{1 - e^{-2\sqrt{q\alpha}t}}{1 + e^{-2\sqrt{q\alpha}t}},$$

где

$$j_\infty = \varepsilon(K_1 + K_2) \frac{V}{d} \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \quad (8)$$

обозначает плотность тока через бесконечно большой промежуток времени.

Таким образом, при переходе от высокого напряжения к очень низкому сила тока вначале равна нулю, а затем, постепенно возрастая, асимптотически приближаются к постоянному значению  $j_\infty$ .

Случай III. Если пренебречь только диффузией ионов и принять во внимание соотношение между ионизацией, рекомбинацией и переносом ионов током, то уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 - (K_1 + K_2) \frac{V}{d^2} n$$

Решение этого уравнения приводится к квадратуре и окончательно принимает вид:

$$\frac{2\alpha n + \beta - \sqrt{\beta^2 + 4\alpha q}}{2\alpha n + \beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha q}} = C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} t} \quad (9)$$

где, согласно прежнему обозначению:

$$\beta = (K_1 + K_2) \frac{V}{d^2}.$$

Разрешая (9) относительно  $n$ , получаем:

$$n = \frac{1}{2\alpha} \frac{C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t} (\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} + \beta) + (\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} - \beta)}{1 - C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t}} \quad (10)$$

Для определения произвольной постоянной  $C$  в (9) полагаем, что при  $t = 0$  число ионов  $n = n_0$ , тогда

$$C = \frac{2\alpha n_0 + \beta - \sqrt{\beta^2 + 4\alpha q}}{2\alpha n_0 + \beta + \sqrt{\beta^2 + 4\alpha q}}$$

В частном случае, если до приложения к электродам разности потенциалов установилось стационарное состояние между ионизацией и рекомбинацией, то

$$n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}$$

Из (9) имеем; при  $t = \infty$

$$n_{\infty} = \frac{1}{2\alpha} (\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} - \beta).$$

Принимая во внимание последнее значение  $n_{\infty}$ , формулу (10) переписываем в виде:

$$n = n_{\infty} \frac{1 + \frac{\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} + \beta}{\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} - \beta} C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t}}{1 - C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t}} \quad (11)$$

Пользуясь выражением для плотности тока:

$$j = en(K_1 + K_2) \frac{V}{d},$$

из (11) находим:

$$j = j_{\infty} \frac{1 + C_1 e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t}}{1 - C e^{-\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} \cdot t}} \quad (12)$$

где

$$C_1 = \frac{\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} + \beta}{\sqrt{\beta^2 + 4\alpha q} - \beta}$$

Формула (12) показывает, что и в этом случае плотность тока, постепенно уменьшаясь, через  $t = \infty$  принимает постоянное значение:

$$j_{\infty} = en_{\infty} (K_1 + K_2) \frac{V}{d},$$

которое в случае высокого напряжения будет плотностью тока насыщения.