

К. А. ВОДОПЬЯНОВ

ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КРИСТАЛЛАХ С ПОЛЯРНЫМИ МОЛЕКУЛАМИ

(Представлено академиком Д. В. Скобельцыным 19 IV 1952)

Многие распространенные электроизоляционные материалы имеют в своем составе полярные молекулы. В некоторых областях температур и частот возможно вращение этих молекул. Эти вращения обуславливают диэлектрические потери дипольного характера, характеризующиеся температурно-частотной зависимостью угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости.

В настоящее время имеется большой экспериментальный материал, доказывающий наличие

дипольных потерь в жидких веществах и в аморфных диэлектриках⁽¹⁾, и крайне мало сведений о поведении кристаллических диэлектриков с полярными молекулами в переменном электрическом поле. Имеющиеся исследования относятся к низкой частоте и касаются, главным образом, диэлектрической проницаемости⁽²⁾.

До сих пор неясен вопрос, какими диэлектрическими свойствами обладают полярные кристаллические диэлектрики в полях высокой частоты. В наших работах⁽³⁾ показывается, что у кристаллов, содержащих кристаллизационную воду (слюда флогопита и гипс), имеются температурные максимумы угла диэлектрических потерь в области высоких частот, которые могут быть объяснены вращением полярных молекул кристаллизационной воды или ее радикалов.

Для выяснения механизма диэлектрических потерь в полярных кристаллах, содержащих кристаллизационную воду, мы произвели измерения угла потерь и диэлектрической проницаемости слюды флогопита, гипса и талька в зависимости от частоты электрического поля. Результаты измерений при комнатной температуре представлены на рис. 1 и 2*, на которых ясно видно наличие максимумов угла потерь.

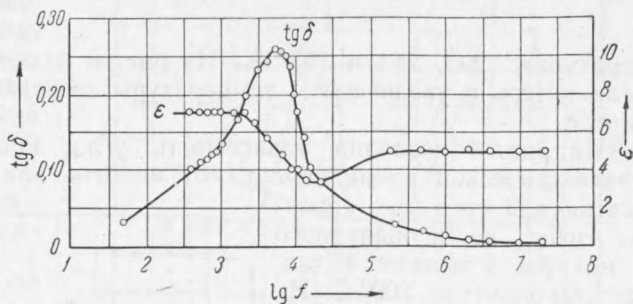


Рис. 1. Зависимость $\text{tg } \delta$ и ϵ слюды флогопита от частоты

* Измерения слюды флогопита в области технической и звуковой частот были проведены А. П. Изергиным.

У слюды флогопита максимум проявился в области звуковых частот; для гипса и талька имеется два максимума: первый, резко выраженный, в области высоких частот и второй, слабо выраженный, особенно у гипса, при меньшей частоте. Для сравнения на рис. 2 приведена зависимость угла потерь от частоты для кристалла каменной соли, в которой нет полярных молекул. Из рис. 2 видно, что в диапазоне частот 10^6 гц и выше угол потерь не зависит от частоты, ниже 10^6 гц он немного возрастает, очевидно, вследствие проявления потерь проводимости.

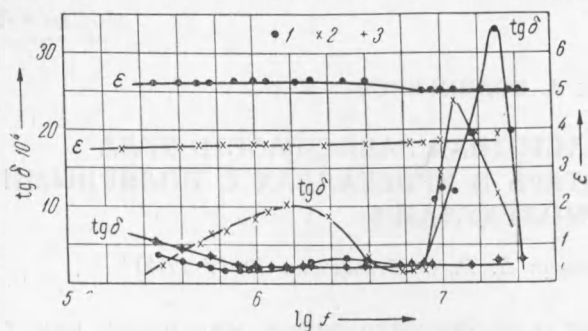


Рис. 2. Зависимость $\text{tg } \delta$ и ϵ от частоты. 1 — кристаллический гипс, 2 — кристаллический тальк, 3 — кристалл каменной соли

Диэлектрическая проницаемость гипса и талька не зависит от частоты в пределах ошибок измерений емкости; у слюды флогопита имеет место перелом в области частот, где обнаруживается максимум угла потерь.

Температурно-частотная зависимость угла потерь кристаллического гипса представлена на рис. 3. Измерения были произведены в диапазоне частот от $2 \cdot 10^5$ до $2,6 \cdot 10^7$ гц при трех температурах:

293, 243 и 193° К. Из рис. 3 видно, что оба максимума угла потерь с увеличением температуры смещаются в сторону высоких частот.

На рис. 4 показана зависимость угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от частоты при разных температурах,

снятая для того же образца гипса, но прокаленного в вакууме в течение 4 час. при температуре 200° С. Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что абсолютные значения угла потерь в результате прокалики гипса увеличились. Кроме того, при температуре 243° К имеют место два резко выраженных максимума угла потерь. При комнатной температуре имеется только высокочастотный максимум угла потерь, низкочастотный не проявился, вероятно, вследствие наложения диэлектрических потерь проводимости, которые в диапазоне частот 10^5 — 10^6 гц превышают дипольные. Максимумы угла потерь для прокаленного образца гипса с увеличением температуры сместились в сторону высокой частоты, так же как и для непрокаленного образца.

Диэлектрическая проницаемость прокаленного гипса уменьшилась по сравнению с непрокаленным; ее значение практически не зависит от частоты.

Полученные нами температурно-частотные зависимости угла диэлектрических потерь для прокаленного и непрокаленного кристаллического гипса, слюды флогопита и талька аналогичны зависимостям, наблюдаемым для полярных жидких и аморфных веществ. Можно считать, что

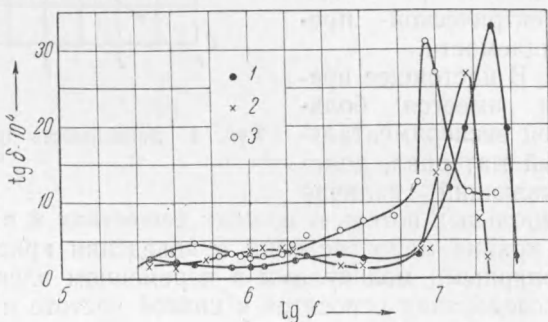


Рис. 3. Частотно-температурная зависимость $\text{tg } \delta$ кристаллического гипса. 1 — 293° К; 2 — 243° К; 3 — 193° К

полученные в кристаллах максимумы угла потерь обусловлены ориентацией полярных молекул кристаллизационной воды или ее радикалов, косвенным доказательством чего является отсутствие максимума угла потерь у неполярного кристалла каменной соли.

Наличие двух температурных ⁽³⁾ и частотных максимумов угла потерь у гипса, повидимому, связано с разной энергией активации полярных молекул. Энергия активации изменяется при прокаливании гипса вследствие изменения концентрации молекул кристаллизационной воды.

Если исходить из общей теории релаксационных диэлектрических потерь, то можно на основе наших экспериментальных данных для кристаллического гипса вычислить энергию активации, необходимую для ориентации полярных молекул, по формуле, предложенной Г. И. Сканами ⁽⁴⁾:

$$U = k \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} (\ln f_1 - \ln f_2), \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана; T_1 и T_2 — температуры в градусах Кельвина; f_1 и f_2 — частоты, соответствующие максимумам угла потерь.

Справедливость применения этой формулы для нашего случая мы проверили путем сравнения вычисленных и экспериментально найденных значений частот, соответствующих первому и второму максимумам угла потерь при температуре 193° К.

На основе кривых рис. 3, относящихся к температурам $T_1 = 293^\circ\text{К}$ и $T_2 = 243^\circ\text{К}$, были найдены значения энергии активации для высокочастотного максимума $U_1 = 0,59 \cdot 10^{-13}$ эрг и низкочастотного $U_2 = 1,62 \cdot 10^{-13}$ эрг. Зная энергию активации полярных молекул, по формуле (1) легко вычислить частоты, соответствующие максимумам угла потерь при $T = 193^\circ\text{К}$. Высокочастотный максимум, согласно нашим вычислениям, должен быть при частоте $f = 9,1 \cdot 10^6$ гц, экспериментально он был наблюден при $f = 9,0 \cdot 10^6$ гц; для низкочастотного максимума вычисленное значение $f = 5,1 \cdot 10^6$ гц, измеренное $f = 5,0 \cdot 10^6$ гц. Как видно, имеет место хорошее совпадение вычисленных значений частот с экспериментальными данными, представленными на рис. 3.

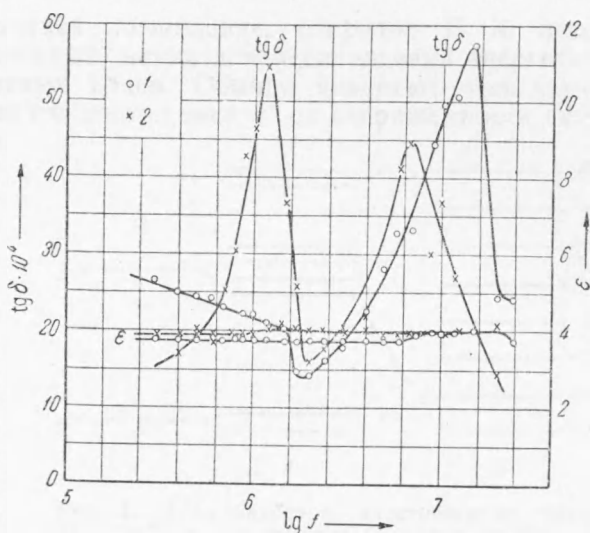


Рис. 4. Частотно-температурная зависимость $\text{tg } \delta$ и ϵ прокаленного гипса. 1 — 293° К; 2 — 243° К

Сибирский физико-технический
научно-исследовательский институт
при Томском государственном университете
им. В. В. Куйбышева

Поступило
4 IV 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ П. П. Кобеко, Г. П. Михайлов и З. И. Новикова, ЖТФ, 19, в. 1 (1949). ² И. Эррера, ЖЭТФ, 3, в. 1 (1933). ³ К. А. Водопьянов, ЖТФ, 19, в. 9 (1949); Тр. СФТИ, в. 28 (1949). ⁴ Г. И. Сканами и А. И. Демешина, ЖЭТФ, 19, в. 1 (1949).