

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ДИЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 26 IX 1951)

В диэлектрике, находящемся в электрическом поле, возникает напряженное состояние. Если между двумя эквипотенциальными поверхностями (электродами) создается однородное поле с напряженностью E , то диэлектрик испытывает давление, определяемое формулой

$$F = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} \approx \frac{\epsilon E^2}{8\pi \cdot 10^3} \text{ г/см}^3. \quad (1)$$

На рис. 1 приведены результаты вычисления давления по формуле (1) для кристаллов щелочногалоидного ряда. Как следует из этих данных, диэлектрик перед пробоем в электрическом поле высокой напряженности может испытывать значительные внутренние давления. По данным В. Д. Кузнецова (1), прочность на разрыв кристаллов солей щелочногалоидного ряда может быть весьма различной, даже для образцов, приготовленных из одного и того же кристалла. Например, для кристаллов KCl изменение прочности при измерении наблюдалось в пределах от 15 до 88 кг/см², для KJ от 15 до 35 кг/см², для KBr от 16 до 40 кг/см², для NaCl от 16 до 50 кг/см² и т. д.

Для однородного материала прочность на сжатие и растяжение должна быть одинаковой. Приведенные выше значения механической прочности в 100—200 раз ниже ожидаемого теоретического значения величины, что указывает на несовершенство исследованных образцов и методов испытания. Диэлектрики перед пробоем подвергаются воздействию механических напряжений, которые могут значительно превосходить их практически определяемую механическую прочность. Измерение силы притяжения электрода к электроду производилось в связи с измерением распределения потенциала по диэлектрику при высоковольтной поляризации.

Распределение объемного заряда в диэлектрике приведет к соответствующему распределению напряженности поля. Если напряженность поля у электродов меньше, чем в средней части диэлектрика и средняя расчетная, то притяжение электрода к поверхности диэлектрика будет меньше, чем вычисленное по формуле (1), действительной для однородного поля. Если же напряженность поля в слоях у поверхности диэлектрика, прилегающих к электроду, больше средней, то измеренная сила притяжения электрода будет больше вычисленной.

Измерялась сила, необходимая для отрывания электрода от эбонита и слюды.

Опыты показали, что вначале, т. е. при малых и средних полях с напряженностью $E \approx 10^4$ в/см, сила, необходимая для отрывания электрода, вычисленная по формуле (1), меньше (на 30%), чем опреде-

ляемая из измерений. Это подтверждает, что объемный заряд в исследованных диэлектриках сосредоточивается, главным образом, в слое вблизи электрода. В результате такого распределения объемного заряда напряженность поля в приэлектродном слое диэлектрика оказывается выше средней. С повышением разности потенциалов, подводимой к электродам, роль обратной электродвижущей силы поляризации уменьшается, так как потенциал поляризации вначале также растет; в дальнейшем он достигает постоянного значения, которое сохраняется независимо от величины приложенного напряжения.

С увеличением напряженности поля для эбонита до значения $8 \cdot 10^4$ в/см и для слюды до значения $5 \cdot 10^4$ в/см величина силы, необходимой для отрывания электрода,

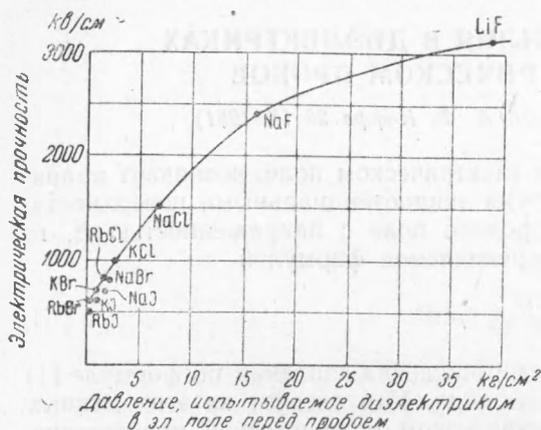


Рис. 1

электродов с поверхностью диэлектрика электроды будут давить на диэлектрик с значительной силой, а при наличии в диэлектрике поля с напряженностью E в чем возникнет давление, определяемого формулой (1).

Мы проводили систематическое изучение электрической прочности твердых диэлектриков при одновременном действии на них механической нагрузки (3). Такие условия имеют место в рассматриваемом случае. Нашими опытами было установлено, что механическая нагрузка на диэлектрик может вызвать значительное понижение его электрической прочности за счет ряда вторичных явлений, например растрескивания, увеличения внутренней пористости и др. Это же было показано в опытах А. А. Воробьева (4), сделавшего вывод, что механически напряженные места в диэлектрике не способствуют распространению по ним электрических разрядов, вплоть до возникновения усилий, близких к разрушающим. Эти опыты показали, что электрические разряды в диэлектрике идут по границе между напряженными и ненапряженными местами, по направлению наибольшего градиента механических напряжений. По этому направлению как раз наиболее вероятно возникновение растрескивания и микронарушений сплошности структуры материала.

Выше было указано, что в диэлектрике при высоких полях могут возникать давления, превосходящие их механическую прочность. Поэтому можно ожидать, что электрическому разрушению будет предшествовать механическое разрушение материала. Затем, как это следует по нашим данным (5), по механически ослабленным местам будет развиваться пробой. Такая картина пробоя особенно может иметь место в неоднородном электрическом поле.

На рис. 1 обращает на себя внимание, что при возрастании механических напряжений в диэлектрике сильно замедляется, а затем и пре-

дидимой для отрывания электрода, вычисленная по формуле (1), совпадает с измеренной на опыте. При последующем увеличении приложенного напряжения наблюдаются отклонения. Величина силы, вычисленная по формуле (1), оказывается больше, чем измеренная на опыте. Эти отклонения могут быть объяснены тем, что при плохо прилегающем электроде в пространстве между электродом и поверхностью диэлектрика имеет место ионизация и зарядка диэлектрика, что приводит к ослаблению силы притяжения электрода (2). В случае хорошего контакта

крашается рост электрической прочности диэлектрика. Это можно истолковать таким образом, что нарушение механической прочности диэлектрика сопровождается также ослаблением или потерей им электрической прочности. По нашим данным, величина электрической прочности связана с энергией решетки. Поэтому должна существовать зависимость между величиной механических напряжений в диэлектрике и энергией решетки.

На рис. 2 давление, испытываемое диэлектриком в электрическом поле перед пробоем, представлено в функции энергии решетки. Сложность наблюдаемой зависимости, вероятно, обуславливается также тем, что в формулу (1) входит величина ϵ . Физические процессы, определяющие эту величину, а именно поляризуемость, связаны со смещением и отщеплением электрона, т. е. с начальной стадией пробоя. Рассматриваемые процессы связаны энергетическими соотношениями, как то: энергия поля, энергия решетки, механическое разрушение материала; они и определяют конечную стадию пробоя.

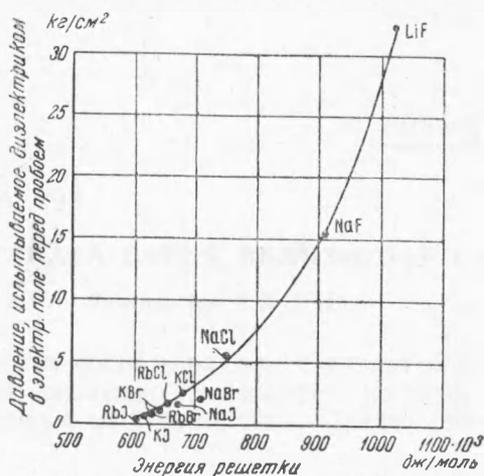


Рис. 2

Кроме сложности физических явлений, определяющих развитие электрического пробоя, следует также отметить, что величины, характеризующие исследуемые реальные диэлектрики, — их механическая и электрическая прочность, которыми мы здесь пользовались, значительно отличаются от величин, определяемых теоретически.

Экспериментальные данные других авторов по определению электрической прочности дают для рассмотренных веществ более высокие значения, достигающие $8 \cdot 10^6$ в/см. Этим еще раз подчеркивается, что для построения удовлетворительной теории пробоя необходимо точно измерять электрическую прочность диэлектриков.

Из изложенного выше можно сделать следующие практические выводы. При электрической нагрузке диэлектрики испытывают значительные механические усилия, поэтому повышение их механической прочности увеличит также и электрическую прочность.

Диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью будут испытывать в электрическом поле также и повышенную механическую нагрузку. Вследствие большой поляризуемости молекул диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью их электрическая прочность будет понижена. Это наблюдается, например, для кристаллов сегнетовой соли. Для повышения электрической прочности таких диэлектриков следует повышать их механическую прочность.

Выражаю благодарность за полезную дискуссию поставленных вопросов проф. А. А. Воробьеву.

Томский политехнический институт
им. С. М. Кирова

Поступило
12 VII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, 2, 1941, стр. 103. ² Физика диэлектриков, 1932, стр. 140. ³ Е. К. Завадовская, Тр. СФТИ (1939). ⁴ А. А. Воробьев, Изв. Томск. политехн. ин-та, 63, 3 (1944). ⁵ А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская, ДАН, 81, № 3 (1951).

ПОПРАВКА

На стр. 542 последнюю фразу второго абзаца (строки 30—34) следует читать:

В случае хорошего контакта электродов с поверхностью диэлектрика электроды будут давить на диэлектрик с значительной силой, а при наличии в диэлектрике поля с напряженностью E в нем возникнет давление, определяемое формулой (1).