

УРАВНЕНИЕ «КРИВОЙ ЖИЗНИ» ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ, В. Ф. ГРАФОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной техники)

Расчет электрической изоляции, определение ее срока службы требуют знания зависимости времени до ее пробоя от напряженности поля (уравнение «кривой жизни»).

Экспериментальное исследование «кривой жизни» изоляции проведено многими авторами [1—8]. В настоящей работе показывается один из возможных путей теоретического получения уравнения «кривой жизни» изоляции.

Флуктуационная теория разрушения материалов при действии механической нагрузки дает [9]:

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{W - \frac{e \alpha z a}{N \left(1 - \frac{2m}{m_u}\right)} \ln \frac{2WN \left(1 - \frac{2m}{m_u}\right)}{\alpha \cdot a \sigma e}}{2kT} \right\}. \quad (1)$$

где τ — время разрыва образца;
 τ_0 — время релаксации колебаний атома в молекуле;
 W — энергия разрыва (диссоциации) связи;
 m — молекулярный вес конца цепи, не воспринимающий нагрузки;
 m_u — молекулярный вес цепи;
 α — коэффициент упорядоченности полимерных цепей, изменяющийся согласно [10] от 1 до 3;
 $2kT$ — средняя энергия двух атомов, образующих одну химическую связь.

$$N = \frac{l \cdot N_A \cdot \rho}{M}. \quad (2)$$

где N_A — число Авогадро,
 ρ — плотность,
 M — молекулярный вес мономерного звена,
 l — длина связи,
 N — число связей, приходящихся на единицу сечения образца,

a — характеризует кривизну потенциальной кривой вблизи ее минимума. Для связи $C-C$

$$a = \frac{l}{3,22}. \quad (3)$$

Разрушение материала определяется величиной подведенной энергии и не зависит от ее природы [11].

В условиях эксплуатации электрическая изоляция подвергается действию электрического поля и механической нагрузки. Увеличение свободной энергии в этом случае составит

$$\Delta W = \Delta W_{\sigma} + \Delta W_M = \frac{\varepsilon E_M^2}{2} + \frac{\sigma^2}{2G_M} = \frac{\sigma_{\sigma}^2}{2G_M}, \quad (4)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость;

E_M — напряженность электрического поля;

σ — механическое напряжение;

G_M — модуль упругости (модуль Юнга);

σ_{σ} — эквивалентное механическое напряжение, создающее в материале такое же увеличение свободной энергии, как и одновременное действие электрической и механической нагрузок.

Подставив в 1 σ_{σ} , определенное из 4 с учетом 2, 3, и обозначив

$$\gamma = \frac{eM\alpha}{3,22 N_{Ap} \left(1 - \frac{2m}{m_{II}}\right)};$$

$$Ae^{-bT} = \frac{\alpha e M \sqrt{\varepsilon G_M}}{3,22 N_{Ap} \left(1 - \frac{2m}{m_{II}}\right)},$$

получим

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{W - \sqrt{\gamma^2 \sigma^2 + (Ae^{-bT} E_M)^2} \ln \frac{2We}{\sqrt{\gamma^2 \sigma^2 + (Ae^{-bT} E_M)^2}}}{2kT} \right\}. \quad (5)$$

Реальные диэлектрики содержат различные неоднородности, приводящие к возникновению локальных напряженностей поля. Максимальную величину локальной напряженности поля при эллиптической форме неоднородности определим [12]

$$E_M = \frac{4\nu}{4 + \kappa + \kappa\nu} \cdot E; \quad (6)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{\rho_1} + j\omega\varepsilon_1}{\frac{1}{\rho_2} + j\omega\varepsilon_2}, \quad (7)$$

где ρ_1 , ε_1 и ρ_2 , ε_2 — удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость неоднородности и материала соответственно;

E — средняя напряженность электрического поля.

Если отношение размера неоднородности в направлении поля к ее диаметру y больше 1, коэффициент x найдем

$$x = \frac{2}{y^2 - 1} \left(2 - \frac{y}{\sqrt{y^2 - 1}} \ln \frac{y + \sqrt{y^2 - 1}}{y - \sqrt{y^2 - 1}} \right). \quad (8)$$

Для простоты запишем

$$E_m = \beta E, \quad (9)$$

где β — коэффициент концентрации локальных напряженностей поля за счет неоднородностей.

Одним из видов неоднородностей в диэлектриках являются газовые включения. Ионизация в газовых включениях приводит к уменьшению срока службы изоляции в результате следующих процессов:

1) уменьшения толщины изоляции за счет ее разрушения эрозией с поверхности;

2) изменения структуры материала, вызывающего снижение его электрической прочности;

3) создания высоких локальных напряженностей поля в диэлектрике.

Работами Артбауэра показано, что пробой изоляции при напряжении, составляющим только 30% от первоначального пробивного, вызвал уменьшение ее толщины за счет эрозии всего на 5—6% [13]. При длительном действии ионизации в газовом включении за счет химических процессов электропроводность полиэтилена возросла на 4 порядка, а кратковременная электрическая прочность уменьшилась только на 10—15% [14].

Отказы изоляции при длительном приложении напряжения не могут быть объяснены только эрозией материала или изменением его структуры под действием ионизации в газовых включениях.

Проводимость ионизированного газа высока и γ можно положить равным бесконечности. Тогда величина локальной напряженности поля определяется только y и средней напряженностью поля. Величину y приближенно найдем:

$$y = \frac{h}{2r}, \quad (10)$$

где h — глубина газового включения в направлении поля,

r — радиус газового включения или радиус анодного пятна при больших размерах газового включения вдоль эквипотенциальной поверхности.

В случае плоской поры радиус анодного пятна найдем [15]

$$r = \sqrt{2Dt}, \quad (11)$$

где D — коэффициент диффузии электронов;

t — время пробега электроном расстояния между двумя стенками включения h .

Время t определим

$$t = \frac{h}{U_e E_{np}}, \quad (12)$$

где U — подвижность электрона;
 E — пробивная напряженность поля в газе.
 Из [16] известно

$$\frac{D}{U_e} = \frac{kT_s}{q_0}. \quad (13)$$

Решая совместно 10, 11, 12, 13, получим

$$y = \sqrt{\frac{hE_{np}q_0}{8kT_s}}. \quad (14)$$

В этих выражениях:

k — постоянная Больцмана;

T_s — электронная температура в газовом разряде;

q_0 — заряд электрона.

Полагая T равным 2000°K , определим значение y при разных h .
 Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

h [мкм]	5	10	20	50	80	100	200	300	400
y	16	17,1	19	23	26	27	34	37	42
y_1	1020	1020	728	298	139	114	26	13	6
β	72	77	88	112	131	137	131	56	22

Выражение (14) дает y в предположении, что радиус анодного пятна равен радиусу электронной лавины. Это явление наблюдается при небольших h . При больших h по стенке поры возникает значительная тангенциальная составляющая напряженности поля, приводящая к появлению поверхностных разрядов. Радиус анодного пятна в этом случае будет определяться радиусом кистевого разряда по поверхности, который определим [17]

$$r = \eta C_{\pi}^2 U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad (15)$$

где η — коэффициент, зависящий от формы приложенного напряжения U ,

C — удельная поверхностная емкость,

$\frac{dU}{dt}$ — скорость изменения напряжения.

В таблице приводится также значение y_1 , рассчитанное из условия развития разряда по поверхности поры.

Из таблицы видно, что с ростом толщины газового включения y увеличивается, а y_1 — уменьшается. По-видимому, при включениях толщиной меньше 100 мкм разряды по поверхности поры отсутствуют и величина локальной напряженности поля определяется газовым разрядом по толщине поры. При толщине поры 200 мкм и более локальная напряженность поля определяется поверхностным разрядом во включении. Из этого предположения по формулам (6—9) вычислено β .

Как видно из таблицы 1, в диэлектрике при наличии газового включения, в котором происходит процесс ионизации, создается высокая локальная напряженность поля E .

Подставляя E_m из (9) в (5), получим

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{W - \sqrt{\gamma^2 \sigma^2 + (Ae^{-bT} \beta E)^2} \ln \frac{2We}{\sqrt{\gamma^2 \sigma^2 + (Ae^{-bT} \beta E)^2}}}{2kT} \right\}. \quad (16)$$

Если σ равно 0, уравнение (16) будет иметь вид

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{W - Ae^{-bT} \beta E \ln \frac{2We}{Ae^{-bT} \beta E}}{2kT} \right\}. \quad (16a)$$

При обработке результатов экспериментов часто пользуются зависимостью $\ln \tau$ от E . Из соотношения (16a) при $T = \text{const}$ найдем

$$\ln \tau = B - CE \ln \frac{D}{E}; \quad (16b)$$

$$B = \ln \tau_0 + \frac{W}{2kT};$$

$$C = \frac{A \beta e^{-bT}}{2kT}; \quad D = \frac{2We^{bT+1}}{A \beta}.$$

На рис. 1 по уравнению (16b) построена зависимость $\ln \tau$ от E . В общем случае получается вогнутая кривая. На рис. 2, 3 приведены экспериментальные «кривые жизни» по данным [1—8]. Теоретическая и экспериментальная зависимости качественно хорошо согласуются меж-

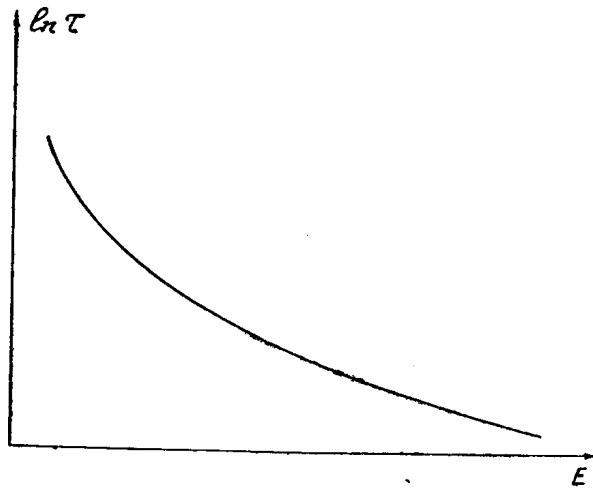


Рис. 1. Теоретическая зависимость $\ln \tau = f(E)$.

ду собой. Количественное сравнение затруднено, так как β является случайной величиной и зависит от вида неоднородностей и их размеров и условий проведения экспериментов.

С возрастанием коэффициентов β долговечность изоляции, как видно из (16a), уменьшается. Приведенные в таблице значения β изменяются от толщины газового включения по кривой с максимумом. Следовательно ожидать, что долговечность изоляции от толщины газового включения должна изменяться по кривой с минимумом. Эксперименты, приведенные в [18], подтверждают высказанное предположение.

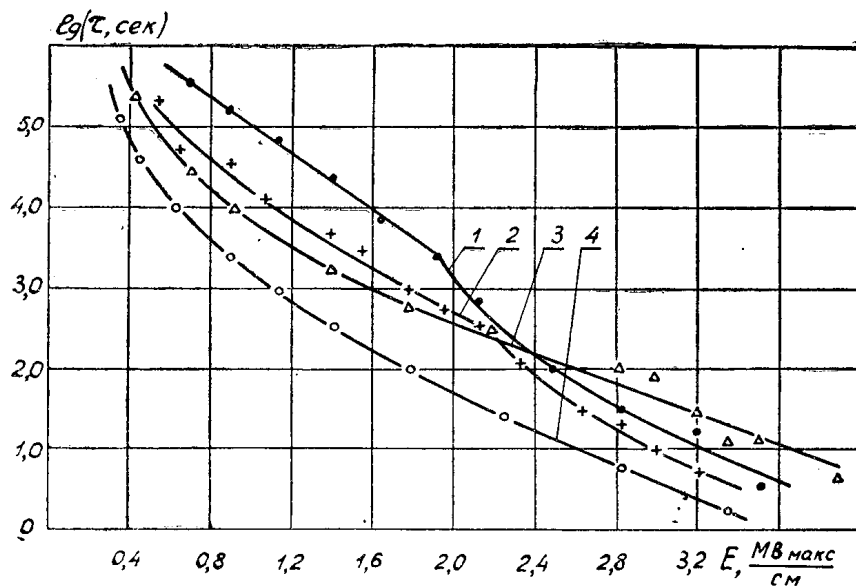


Рис. 2. Зависимость $\lg \tau = f(E)$ в переменном поле для пленок ПЭ (1), ПС (2), ПЭТФ (3), ПТФЭ (4) при нормальной температуре по данным [1].

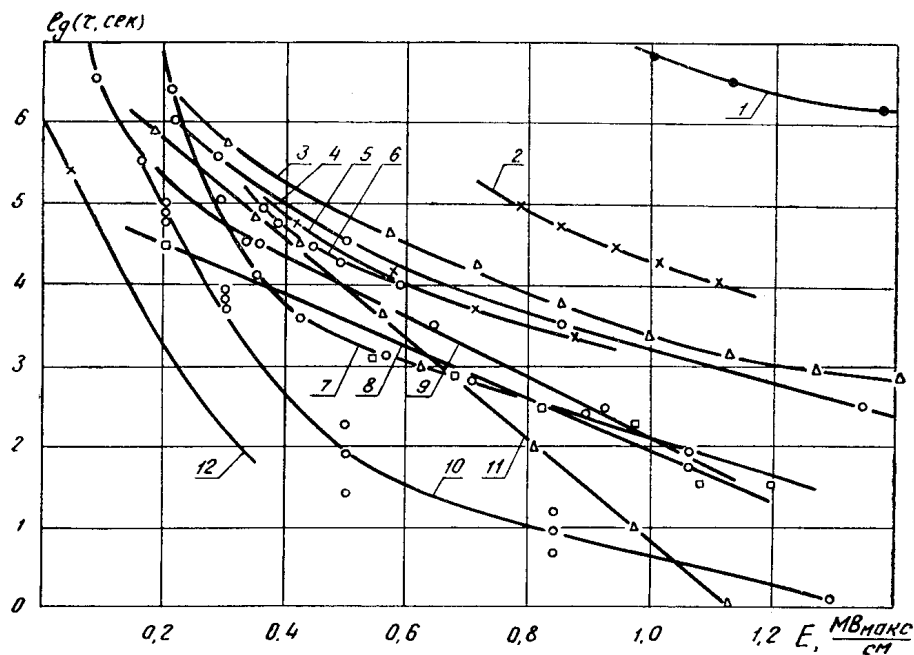


Рис. 3. Зависимость $\lg \tau = f(E)$ в переменном поле 1, 4 — ПЭ по данным [5, 4], 6, 7, 8, 9, 10 — ПТФЭ по [8, 7, 2, 4, 3], 2 — ПС по [8], 3, 11 — ПЭТФ по [7, 3], 5 — пропитанная конденсаторная бумага КОН-1 по [6], 12 — триацетатная пленка по [3].

Таким образом, долговечность электрической изоляции определяется локальной напряженностью поля, создаваемой неоднородностью ее структуры. Ионизация в газовых включениях является частным случаем неоднородностей с нелинейной характеристикой.

Выведенное уравнение «кривой жизни» можно использовать для обработки экспериментальных результатов по долговечности материалов и прогнозирования срока службы электрической изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Барабанов, С. Н. Койков, В. А. Фомин, А. Н. Цикин. Ионизационное старение полимерных пленок в широком интервале температуры, напряжения и частоты. «Электромеханика», 1963, № 12, 15—19.
2. Ш. Т. Абзанидзе. Исследование свойств пленки фторопласта с целью применения его для изоляции электрических машин. Научно-техн. бюлл. ЛПИ, «Электромеханика», 1957, № 11.
3. Н. В. Александров, Е. А. Калинина, С. Г. Трубачев. Определение короностойкости электроизоляционных материалов различными методами. «Электричество», 1961, № 4.
4. А. Р. Хиппель. Диэлектрики и их применение. Госэнергоиздат, 1959.
5. R. G. Rhudy, H. E. Mazanek. Accelerated voltage endurance tests. „Power Apparatus and Systems“ 1960, № 49, 576—580.
6. Д. С. Варшавский. К вопросу об электрической прочности многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги при длительном приложении напряжения частотой 50 гц. Изв. вузов, «Энергетика». 1964, № 1, 19—26.
7. Н. Г. Сахно, А. С. Романов. Влияние частоты на стойкость некоторых полимерных пленок к действию электрического напряжения. Сб. «Обмен опытом в электрической промышленности», 1967, вып. 1, 61—73.
8. Ш. Т. Абзанидзе. О длительной электрической прочности некоторых изоляционных материалов и влиянии на них разряда. Тр. Н. И. Эл. техн. ин-та Совнархоза Груз. ССР, 1961, 1, 75—83.
9. А. И. Губанов, А. Д. Чевычелов. К теории разрывной прочности твердых полимеров. ФТТ, 1962, 4, № 4, 928—933.
10. Ф. Бюхе. Разрывная прочность пластиков ниже температуры стеклования. Физика полимеров (сб. статей). Изд-во ИЛ, 1960, 49—57.
11. А. А. Воробьев. Аналогия и различия при температурном, механическом, термическом и электрическом разрушениях твердых диэлектриков. Сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников». Изд-во «Энергия», 1964.
12. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков (область сильных полей). Изд. физ. мат. литературы, 1958.
13. I. Artbauer, I. Griac. Der Durchschlag von Kunststoffen unter Einwirkung von Glimmentladungen. „Electric“, 1963, 17, № 4, 120—124.
14. В. Г. Сотников. Влияние частичных разрядов в воздушном слое на некоторые характеристики полиэтилена. Сб. «Электрическая аппаратура и электрическая изоляция». М., «Энергия», 1970, 467—475.
15. Дж. Мик, Дж. Крэгс. Электрический пробой в газах. Изд-во ИЛ, 1960.
16. Ю. Н. Вершинин. Электрический пробой твердых диэлектриков. Изд-во «Наука», СО АН СССР, Новосибирск, 1968.
17. М. Е. Иерусалимов, Н. Н. Орлов. Техника высоких напряжений. Изд-во Киевского университета, Киев, 1967.
18. Н. С. Ильченко, И. Н. Онищук. Срок службы изоляции при выпрямленном напряжении. Сб. «Ионизационное разрушение, короностойкость и электрическая прочность органической высоковольтной изоляции радиоэлектронного электрооборудования (тезисы докладов)». Изд-во Киевского дома научно-технической пропаганды, Киев, 1969.