

## ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ РАЗРЯДА НА ПРОЦЕСС ИОНИЗАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Ю. Н. ШУМИЛОВ

(Представлена научно-методическим семинаром кафедры электроизоляционной  
и кабельной техники)

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что органическая изоляция, длительно работающая в условиях интенсивной ионизации, подвергается старению и постепенному разрушению. Разрушение изоляции может быть обусловлено следующими причинами:

- а) химическим воздействием на изоляцию продуктов ионизации воздуха — озона и окислов азота, являющихся сильными окислителями;
- б) бомбардировкой ионами и электронами, освободившимися при ионизации воздуха;
- в) воздействием высокой температуры, созданной в районе ионизации за счет местного повышения потерь.

Кроме указанных причин, было установлено, что при длительном воздействии разрядов внутри газовых включений образуются побочные продукты ионизации — влага, кислоты, продукты разложения твердого диэлектрика и т. д., которые могут оказывать косвенное воздействие на процесс ионизации в газовом включении и на «время жизни» диэлектрика [1—5]. Роджерс [4] и другие [2, 3] показали, что влага и кислоты, осаждаясь на стенках газового включения, образуют тонкую полупроводящую пленку, которая шунтирует газовое включение и вызывает затухание ионизации. При затухании ионизации происходит увеличение «времени жизни» диэлектрика и, в этом смысле, образование побочных продуктов ионизации является благоприятным фактором для длительной работы изоляции. В то же время существует мнение, что побочные продукты могут диффундировать в твердый диэлектрик и образовывать в нем участки с повышенной проводимостью или увеличенными потерями энергии. Это обстоятельство может вызвать снижение длительной электрической прочности и сокращение «времени жизни» изоляции. Гипотеза о влиянии продуктов ионизации на электрические характеристики диэлектрика впервые была высказана Уайтхедом [1] и в дальнейшем получила частичное подтверждение в работе [6], в которой было показано, что при длительном воздействии коронных разрядов происходит заметное снижение удельного объемного сопротивления полиэтилена. Однако вопрос изменения электрической прочности диэлектриков в результате диффузии продуктов разряда в твердый диэлектрик практически не изучен.

Настоящая работа посвящена исследованию процессов в газовых включениях применительно к резиновой изоляции и исследованию влия-

ния продуктов изоляции на электрическую прочность высоковольтной резины.

### Исследование процессов в газовом включении

Исследование процессов внутри газового включения производилось на моделях с искусственным газовым включением, приведенных на рис. 1 (тип А, тип Б). Модели типа А использовались для исследования затухания ионизации, модели типа Б — для исследования явлений на поверхности стенок включений. Глубина включения во всех случаях рав-

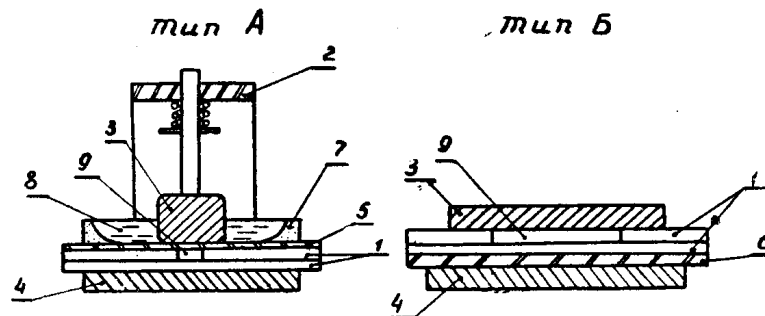


Рис. 1. Эскизы моделей типа А для исследования затухания ионизации и типа Б для исследования явлений на поверхности стенок включения:  
1 — резиновые пластины (ТС-35), 2 — держатель электродов, 3 — высоковольтный электрод, 4 — низковольтный электрод, 5 — слюда, 6 — стеклянная пластинка, 7 — буртики из маслостойкой мастики, 8 — трансформаторное масло. 9 — воздушное включение (для модели типа А диаметр включения 1,8—5 мм, для модели типа Б — 50 мм).

нялась 0,4 мм. На модели подавалось переменное напряжение частотой 50 гц и 1000 гц, равно  $2,5 U_n$  ( $U_n$  — напряжение начала ионизации). Через определенные промежутки времени производилось измерение интенсивности ионизации  $I$ , удельного поверхностного сопротивления стенок газового включения  $\rho_s$  и определялся водородный показатель рН для капель дистиллированной воды, нанесенной внутрь газового включения.

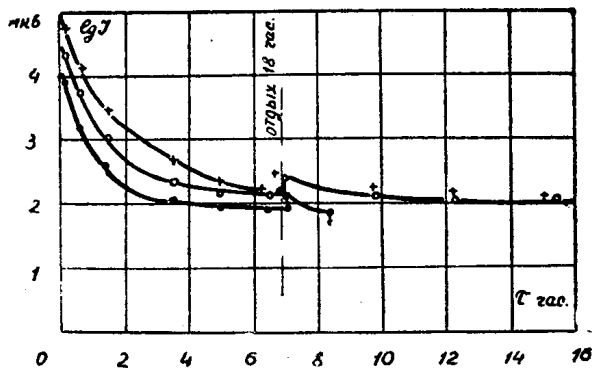


Рис. 2. Зависимость интенсивности ионизации от времени воздействия напряжения:  
●● — диаметр включения 1,8 мм, ○○ — диаметр включения 3,5 мм, ++ диаметр включения 5 мм

5 мм. Из приведенного рисунка видно, что наиболее быстрое затухание ионизации имеет место в первые два часа, после чего наблюдается сравнительно медленное затухание ионизации. Во включениях диамет-

Рис. 2. Зависимость интенсивности ионизации от времени воздействия напряжения. Водородный показатель рН служил мерой образования кислой среды внутри газового включения. Интенсивность ионизации определялась согласно методике, описанной в [7]; поверхностное сопротивление измерялось на гальванометрической установке и рН колориметрическим методом. Для определения  $\rho_s$  и рН модели типа Б вынимались из испытательного стенда и разбирались. После измерений модели заменялись новыми.

На рис. 2 приведены наиболее характерные кривые затухания ионизации для включений диаметром 1,8; 3,5 и

ром 1,8 мм в течение 3—10 час. произошло полное затухание ионизации. Во включениях диаметром 3,5 мм после 50 час. испытаний полное затухание ионизации имело место только в 4 из 12 испытуемых моделей. В моделях с диаметром включения 5 мм после 10 час. интенсивность ионизации снизилась до  $5 \cdot 10^{-12}$  к и практически не уменьшалась в течение всего времени испытаний (около 100 часов).

В табл. 1 приведены результаты измерения  $\rho_s$  и рН для моделей типа Б. Из табл. 1 видно, что изменение  $\rho_s$  и рН аналогично изменению интенсивности ионизации. Идентичность зависимостей  $\lg I = f(\tau)$ ;  $\lg \rho_s = f(\tau)$  и  $\text{pH} = f(\tau)$  убедительно подтверждает механизм затухания, вызванный шунтированием газового включения.

Таблица 1

Изменение  $\lg \rho_s$  и рН от времени испытания

Время воздействия (час)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
$\lg \rho_s$ $f=50$ гц	16	15,3	14,8	14,2	13,8	12,8	12,2	12
$\lg \rho_s$ $f=1000$ гц	16	10	9,5	9	8,5	8,5	8,4	8
рН $f=1000$ гц	7	4	4,5	5,5	6	6	6	6

При разборке моделей было замечено, что резина в зоне разряда приобретает желто-коричневый цвет и на поверхности электрода образуются кристаллы голубого цвета. Химический анализ показал, что образуемые кристаллы являются солями азотной и серной кислоты  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{CuSO}_4$ . Качественными реакциями для определения ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в растворе явились реакции соответственно с дифениламином  $(\text{C}_6\text{H}_5)\text{NH}$  и хлоридом бария  $\text{BaCl}_2$ . Образование азотной кислоты в газовом разряде в воздушной среде хорошо известно [9]. Образование серной кислоты в газовых включениях очевидно, что присуще только для резиновой изоляции и связано, видимо, с выделением серы из резины при электронной (ионной) бомбардировке.

Таким образом, в резиновой изоляции при длительном воздействии ионизации внутри газовых включений происходит сравнительно быстрое образование полупроводящей пленки и затухание ионизации. При испытательном напряжении, равном  $2,5 U_n$ , во включениях диаметром 1,8 мм происходит полное затухание ионизации. Во включениях большего диаметра ионизация может существовать длительное время.

### Влияние продуктов разряда на кратковременную электрическую прочность резиновой изоляции

При длительном воздействии разрядов на резиновые пластины, помещенные между двумя стеклянными пластинами с зазором, было обнаружено, что кислая среда образуется только в зоне непосредственного воздействия разряда. В связи с этим обработка резиновых пластин продуктами ионизации проводилась не косвенно, как рекомендуется в [5], а при непосредственном воздействии разряда. Резиновые пластины толщиной 0,4 мм помещались в промежуток между медным электродом и стеклянной пластиной, на внешней поверхности которой были нанесены электроды диаметром 15 мм, и выдерживались в течение 30 мин. при напряжении, равном  $2,5 U_n$  ( $f=1000$  гц). Зазор между поверхностью резины и стеклянной пластиной составлял 0,4 мм. Время обработки и частота испытательного напряжения были выбраны из условий макси-

мального выхода кислой среды и минимального времени воздействия разряда (табл. 1). После обработки разрядом производился осмотр поверхности резиновых пластин в бинокулярный микроскоп. При осмотре не было замечено признаков разрушения поверхности резины. Спустя 5 часов после обработки определялась электрическая прочность резиновых пластин  $E_{пр}$  на промышленной частоте ( $f = 50$  гц). Для исключения пробоев с края электрода образцы погружались в трансформаторное масло с добавкой 20% дибутилфталата.

В связи с большим разбросом значений  $E_{пр}$  резиновых пластин испытания проводились на большом числе образцов и затем проводилась статистическая обработка полученных результатов.

Таблица 2  
Ряд распределения электрической прочности резины ТС-35 до и после обработки коронными разрядами.

$E_{пр}$ кв/мм	$n_1$	$n_2$
	1	2
31,25	1	2
33,75	1	2
36,25	4	3
38,75	6	5
41,25	8	9
43,75	14	19
46,25	16	17
48,75	20	19
51,25	16	11
53,75	8	9
56,25	5	2
58,75	1	1
$\Sigma n_i$	100	100

В табл. 2 приведены экспериментальные частоты для необработанных пластин (столбец 2) и для пластин, обработанных продуктами разряда (столбец 3).

Было определено, что распределение значений  $E_{пр}$  необработанных пластин подчиняется нормальному закону со средним значением  $\bar{E}_{пр1}$ , равным 46,9 кв, и с основным отклонением  $\sigma_1$ , равным 5,47 кв.

$$f(E_{пр}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(E_{прi} - E_{пр})^2}{2\sigma^2}}$$

Проверка по критерию Пирсона [8] показывает, что экспериментальное распределение соответствует нормальному распределению с достоверностью больше, чем 80%.

Доверительные границы  $\bar{E}_{пр1}$  при 5% уровне значимости, определенные как  $\bar{E}_{пр1} \pm 1,96 \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$ , составляют соответственно

45,83 кв и 47,97 кв.

Статистики экспериментального ряда обработанных пластин  $\bar{E}_{пр2}$  и  $\sigma_2$  соответственно равны 46,2 кв и 5,46 кв. Можно видеть, что  $\bar{E}_{пр2}$  находится внутри доверительных границ распределения электрической прочности первого ряда. Оценка дисперсии  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  по критерию Романовского [8] показывает, что расхождение между дисперсиями 1 и 2 рядов незначимо. Таким образом, обработка резиновых пластин продуктами разряда не приводит к снижению их электрической прочности.

### Выводы

1. Исследование процессов ионизации в резине на моделях газового включения позволило обнаружить образование во включении побочных продуктов ионизации — азотной и серной кислот и их солей.

2. Образование побочных продуктов ионизации приводит к сравнительно быстрому затуханию ионизации и не приводит к снижению электрической прочности резиновых пластин.

3. При напряжении, равном  $2,5 U_n$ ,  $f = 50$  гц, во включениях диаметром 1,8 мм в течение 3—10 часов происходит полное затухание ионизации. Во включениях большего диаметра разряды величиной  $(5 \div 10) \cdot 10^{-12}$  к могут существовать длительное время.

4. При рассмотрении процесса ионизационного старения резиновой изоляции необходимо учитывать явление быстрого затухания ионизации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Уайтхед. Пробой твердых диэлектриков, Госэнергоиздат, 1957.
2. A. M. Thomas, J. I. E. E., vol. 91, pt 11, с. 549.
3. Стойкость листовой изоляции к поверхностным разрядам. Отчет BEARA NL/T 379, 1958.  
Перевод № 5238. ЦБТИ НИИ электропромышленности.
4. Rogers E. S. Proc. Instn. Electr. Engrs, vol 105A, с. 621—630, 1958.
5. Дж. Б. Беркс, Дж. Г. Шулман. Прогресс в области диэлектриков. Том I, ГЭИ, 1962.
6. В. Г. Сотников. Влияние частичных разрядов в воздушном слое на электрическое сопротивление полиэтилена. «Кабельная техника», 1964, № 33.
7. Г. С. Кучинский, О. О. Тапупере. Регистрация ионизационных характеристик изоляции. «Электричество», 1960, № 11.
8. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1961.
9. А. Б. Шехтер. Химические реакции в электрическом разряде. ОНТИ, Л.—М., 1936.