

К ВОПРОСУ О РАЗРЯДАХ В ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной и кабельной
техники)

Ряд работ [1, 2, 3] посвящен изучению разрядов в газовых включениях в твердом диэлектрике. В литературе указывается, что разряды в газовых включениях оказывают разрушающее влияние на органическую изоляцию и приводит к быстрому ее пробою. Однако до настоящего времени слабо освещен в литературе вопрос о характере разрядов при изменении размеров пор в изоляции. Недостаточно освещаются вопросы влияния размеров газовых пор на разрушение диэлектриков.

Для простоты рассмотрения механизма разряда примем, что газовая пора имеет форму цилиндра, ось которого совпадает с направлением электрического поля. На противоположных стенках поры перед разрядом в ней будет накапливаться удельная энергия, определяемая по формуле

$$W_{уд} = \frac{U^2 C}{2S} = \frac{E_{гр}^2 d^2 \xi S}{2 \cdot 4\pi d S 9 \cdot 10^{11}} = \frac{E_{гр}^2 d \xi}{72\pi 10^{11}} \left[\frac{вт \cdot сек}{см^2} \right]. \quad (1)$$

Удельный поверхностный заряд, накопленный на противоположных стенках газовой поры перед разрядом в ней найдется

$$q = \frac{UC}{S} = \frac{E_{пр} d \xi S}{4\pi d S 9 \cdot 10^{11}} = \frac{E_{пр} \cdot \xi}{36\pi \cdot 10^{11}} \left[\frac{к}{см^2} \right]. \quad (2)$$

Через включенный последовательно с газовой порой диэлектрик плотность тока при переменном напряжении может быть рассчитана перед моментом пробоя

$$j = \frac{U \omega C}{S} = E_{пр} d \frac{\xi S 2\pi f}{4\pi d S 9 \cdot 10^{11}} = \frac{E_{пр} \xi f}{1,8 \cdot 10^{12}} \left[\frac{а}{см^2} \right]. \quad (3)$$

В этих формулах:

U — напряжение между стенками поры перед моментом разряда;

C — емкость поры;

d — размеры поры в направлении поля;

S — площадь поры;

ξ — диэлектрическая проницаемость газа, заполняющего пору;

f — частота переменного тока;

$E_{пр}$ — электрическая прочность газа, заполняющего пору, при соответствующих расстояниях d и давлении газа.

Результаты расчетов удельных энергетических характеристик поры в зависимости от ее толщины перед разрядом в газе приведены в табл. 1.

В расчетах принималось, что в поре заключен воздух при давлении 760 мм. рт. ст.

Энергетические характеристики, удельный поверхностный заряд и плотность тока монотонно убывают с возрастанием толщины газовой поры, а удельная энергия имеет минимальное значение в области толщин от 20 до 80 мк.

Интересно было посмотреть, каковы условия развития электронных лавин в такой газовой поре при напряженностях поля, равных пробивным.

Таблица 1

№ п. п.	d см	$E_{пр}$ кв/см	$W_{уд}$ вт. сек/см ²	q к/см ²	j а/см ²	$U_{пр}$ в
1	0,0005	700	$10,8 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	350
2	0,001	400	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$3,54 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	400
3	0,002	236	$5 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	472
4	0,005	136	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	680
5	0,008	111	$4,36 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	888
6	0,01	102,5	$4,65 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	1025
7	0,1	45,6	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	4650

Подсчитаем заряд, который может накапливаться в головке лавины, в конце участка пути, равном толщине газовой включения. По уравнению Таунсенда

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (4)$$

коэффициент ударной ионизации электронами α зависит от напряженности поля и давления воздуха. В табл. 2 приводится расчет количества электронов, приходящих на анод в газовой поре и величина отрицательного заряда одной лавины.

Таблица 2

№ п. п.	d см	pd мм рт. ст. / см	$\frac{E}{p}$ в/см мм рт. ст.	$\frac{\alpha}{p}$	α	αd	$e^{\alpha d}$	$Q_{лав}$ кулон
1	0,0005	0,38	921	10,25	7800	3,9	49,5	$79,3 \cdot 10^{-19}$
2	0,001	0,76	526	6,85	2500	5,2	181	$290 \cdot 10^{-19}$
3	0,002	1,52	310	4,43	3360	6,72	829	$1,32 \cdot 10^{-16}$
4	0,005	3,8	179	2,51	1900	9,5	13300	$213 \cdot 10^{-17}$
5	0,008	6,08	146	1,51	1150	9,2	10000	$16 \cdot 10^{-16}$
6	0,01	7,6	135	1,24	942	9,42	12300	$19,7 \cdot 10^{-16}$
7	0,1	76	61,3	0,105	79,8	7,98	2920	$4,68 \cdot 10^{-16}$

При движении электронной лавины происходит расширение ее головки за счет диффузии электронов. Радиус головки электронов, определяемый из условий диффузии, найдется:

$$r = \sqrt{2Dt}, \quad (5)$$

где D — коэффициент диффузии;
 t — время движения лавины электронов.

Электронная лавина, попадая на анод, вызывает нейтрализацию заряда на поверхности диэлектрика, имеющего площадь πr^2 . Заряд, который имеется на анодной стороне поры площади πr^2 может быть найден

$$Q_r = \pi r^2 q = 2\pi D t q. \quad (6)$$

Время пересечения электронной лавиной газового промежутка составит

$$t = \frac{d}{\kappa E_{\text{пр}}} \quad (7)$$

где κ — подвижность электронов.

Тогда формула (6) будет иметь вид

$$Q_r = \frac{2\pi D d q}{\kappa E_{\text{пр}}}. \quad (6a)$$

Отношение коэффициента диффузии к подвижности электронов определяется давлением газа, температурой и рядом других факторов. Для нашего случая можно воспользоваться выражением

$$\frac{D}{\kappa} = \frac{\kappa T_e}{q_0}, \quad (8)$$

где κ — постоянная Больцмана;

T_e — температура электронов в лавине;

q_0 — заряд электрона.

Тогда

$$Q_r = \frac{2\pi\kappa}{q_0} = \frac{dT_e}{E_{\text{пр}}} q \quad (6б)$$

Заряд, переносимый одной электронной лавиной на анод, мы обозначим Q (табл. 2). Обозначим

$$An_0 = \frac{Q_r}{Q}, \quad (9)$$

Величина An_0 показывает число электронных лавин, которые должны прийти на анод для нейтрализации заряда на площади πr^2 . Воспользовавшись выражением (4) и (6б) найдем

$$An_0 = \frac{2\pi\kappa}{q_0^2} \frac{d}{E_{\text{пр}} e^{ad}} T_e q. \quad (10)$$

При разрядах в воздухе температура электронов составляет 2000—4000°K [4].

Задавшись определенной температурой, нетрудно подсчитать величину по формуле (10). В табл. 3 приводятся результаты расчетов An_0 при различной толщине газовой поры.

Из табл. 3 видно, что с увеличением толщины поры уменьшается количество лавин, необходимое для нейтрализации заряда на стенке поры.

Рассматривая табл. 2 и 3 следует отметить, что с увеличением толщины газового включения возрастает заряд в лавине электронов, а следовательно и положительный заряд в объеме поры.

Анализируя табл. 2 и 3, можно предположить, что в порах малых размеров разряд представляет серию небольших, следующих друг за другом лавин, число которых возрастает при увеличении напряженности поля во включении.

По мере увеличения толщины газового включения количество зарядов, нейтрализованных лавиной на стенке поры, возрастает. В резуль-

тате нейтрализации поверхностного заряда в месте попадания лавины электронов будет происходить резкое уменьшение потенциала в данной точке и появиться значительная тангенциальная составляющая напряженности поля, приводящая к возникновению поверхностного разряда.

Таблица 3

№ п. п.	d см	An_0	
		$T_e = 2000^\circ\text{K}$	$T_e = 4000^\circ\text{K}$
1	0,0005	17,5	35
2	0,001	10,8	21,6
3	0,002	5,88	11,76
4	0,005	4,75	9,5
5	0,008	0,795	1,59
6	0,01	0,314	0,628
7	0,1	0,0344	0,0688

Поверхностный разряд в поре толщиной 0,3 мм наблюдал Мазон [1]. За счет поверхностных разрядов энергия, выделяющаяся в газовой поре резко возрастает, что будет приводить к разрушению диэлектрика. Значительная величина тангенциальной составляющей напряженности поля появится при условии полной нейтрализации поверхностного заряда в месте попадания электронной лавины.

Таким образом, при малых толщинах пор будет наблюдаться в порах одиночные, бы-

стро следующие друг за другом и более или менее распределенные по площади стенки поры лавины электронов. В этом случае разрушение материала диэлектрика будет весьма малым. При больших размерах газовых включений характер разряда приобретает вид искры с довольно значительным выделением энергии и с быстрым разрушением материала, составляющего стенки поры.

Разряд в мелких газовых включениях может существовать весьма длительно, не вызывая заметного износа изоляции. Критерием перехода к искровому разряду в газовой поре может являться показатель An_0 . Если $An_0=1$, то разряд становится искровым и разрушение изоляции будет происходить весьма интенсивно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mason. The deterioration and breakdown of dielectrics Resultung from internal discharges. Proc. IEE part 1, Vol. 98, № 109, 1951.
2. А. В. Дмитриев. Природа газового разряда в полости, окруженной диэлектриком или ограниченной поверхностями диэлектрика и проводника. Сб. «Ионизационное старение, короностойкость и методы испытаний высоковольтной изоляции», изд. ЦИТИ, 1963.
3. Ч. М. Джуварлы, Г. В. Вечхайзер, Ю. В. Горик, П. В. Леонов. Вольтамперные характеристики электрического разряда в газовой полости, ограниченной диэлектриком. Изв. АН Азерб. ССР. Серия физ.-техн. и матем., 1966, № 2, 139—146.
4. Дж. Мик, Дж. Крэгс. Электрический пробой в газах. Изд. ИЛ. 1960.