

ОБРАЗОВАНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО КАНАЛА В СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЯДА В КАМЕННОЙ СОЛИ

М. Н. ЛИСЕЦКАЯ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
высоких напряжений)

При пробое диэлектрика электроды соединяются проводящим каналом. Наблюдение каналов пробоя показало, что они имеют ровные, оплавленные края, а канал — круглое сечение. Это позволяет предполагать, что каналы образуются в результате расплавления диэлектрика. Сразу после соединения каналом электродов его диаметр невелик. Об этом свидетельствует микрофотография пробоя (рис. 1), которая полу-

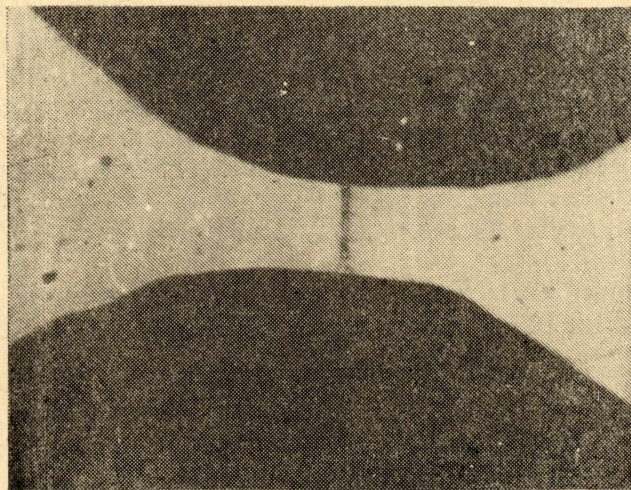


Рис. 1. Микрофотография пробоя в каменной соли при увеличении E при «отсечке» напряжения.

чена при ограничении энергии, поступающей в канал сразу после замыкания электродов, путем «отсечки» напряжения.

Сопротивление канала может быть подсчитано, как

$$R_1 = \rho \frac{l}{S_1},$$

где ρ — удельное сопротивление,
 l — длина канала,
 S — сечение.

Для каменной соли при температуре 800°C $\rho = 3 \cdot 10^3 \frac{\text{ом} \cdot \text{см}^3}{\text{м}}$.

Принимая радиус канала равным 2 мк , а межэлектродное расстояние 250 мк , получаем сопротивление канала $6 \cdot 10^4 \text{ ом}$. При протекании тока в канал поступает энергия $w = \frac{U^2 \Delta t}{R}$. Зная U , R и задаваясь

интервалом времени Δt , можно получить численное значение w . Если предположить, что эта энергия идет на разогрев и расплавление канала, то можно подсчитать приращение сечения канала и уменьшение сопротивления за счет этого. Расчет производится по формуле

$$0,24 \frac{U^2}{R} \Delta t = d \Delta S l [C (T_{\text{пл}} - T) + K],$$

где $d = 2,2 \text{ г/см}^3$ — плотность NaCl ,
 $l = 250 \text{ мк}$ — длина канала,

$C = 0,204 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$ — удельная теплоемкость,

$K = 123,5 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$ — удельная теплота плавления.

Для NaCl с графитовыми электродами $E_{\text{пр}} = 1,43 \frac{\text{мгв}}{\text{см}}$ $d = 0,25 \text{ мм}$;
 $U = 36 \text{ кв}$. Задаваясь интервалом времени $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ сек}$, получаем приращение сечения канала ΔS . Полное сечение канала через Δt будет $S_2 = S_1 + \Delta S$, а сопротивление канала $R_2 = \rho \frac{l}{S_2}$.

Такой расчет производился через $\Delta t = 0,5 \text{ нсек}$. Оказалось, что спад напряжения, который может произойти, когда сопротивление канала станет соизмеримым с сопротивлением генератора, начнется не сразу после соединения электродов каналом, а через 3 нсек , а спад напряжения до уровня $0,2 U_{\text{макс}}$ происходит еще за 7 нсек .

Изменение радиуса канала и сопротивления представлено на рис. 2. При сравнении спада напряжения по осциллограмме (рис. 3) и по расчету (рис. 4) видим, что спад напряжения по расчету происходит быстрее, чем на опыте.

Можно предположить, что после расплавления канала до определенного объема энергия идет только на перегрев канала, т. е.

$$w = 0,24 \frac{U^2 \Delta t}{R} = mc \Delta t^{\circ},$$

где Δt° — приращение температуры.

При нагревании изменение проводимости по данным (1) происходит по закону

$$\gamma = \left(\frac{T}{300} + 0,7 \right) \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}.$$

При $r = 5 \text{ мк}$, $l = 250 \text{ мк}$, $\gamma_1 = 3,3 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ при 800°C получаем $R = 104 \text{ ом}$, а $w = 1,55 \cdot 10^{-5} \text{ дж}$. Сравним приращение γ за счет плавления и за счет перегрева. При плавлении приращения площади

$$\Delta S = \frac{w}{[C (T_{\text{пл}} - T) + K] dl} = 10^{-6} \text{ см}^2,$$

при этом $\Delta \gamma_1 = \gamma_1 \frac{\Delta S}{S} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1}$.

При перегреве $\Delta t^\circ = \frac{w}{\pi r^2 l d c} = 1,87 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C};$

$T = T^1 + \Delta t^\circ = 2,67 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C};$

$\gamma_2 = \left(\frac{T}{300} + 0,7 \right) = 9,6 \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1};$

$\Delta \gamma_2 = (\gamma_2 - \gamma_1) \frac{S}{l} = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ ом}^{-1};$

$\Delta \gamma_2 > \Delta \gamma_1.$

Получается, что приращение проводимости при перегреве больше, чем при плавлении, т. е. сопротивление уменьшается быстрее, более быстрый спад напряжения, чем при расплавлении. При расчете оказалось,

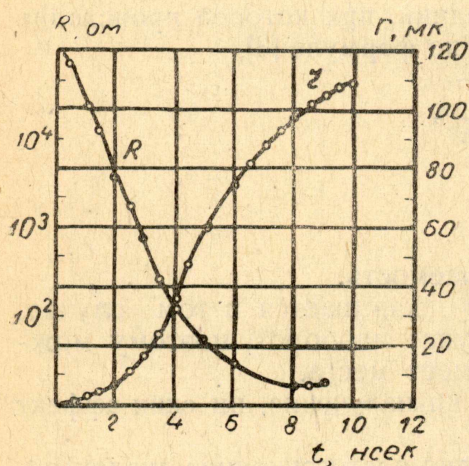


Рис. 2. Изменение радиуса канала и сопротивления при плавлении за счет энергии, поступающей в канал.

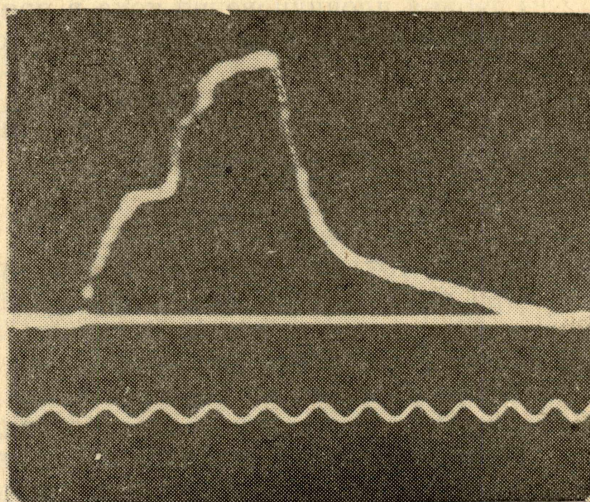


Рис. 3. Осциллограмма пробоя.

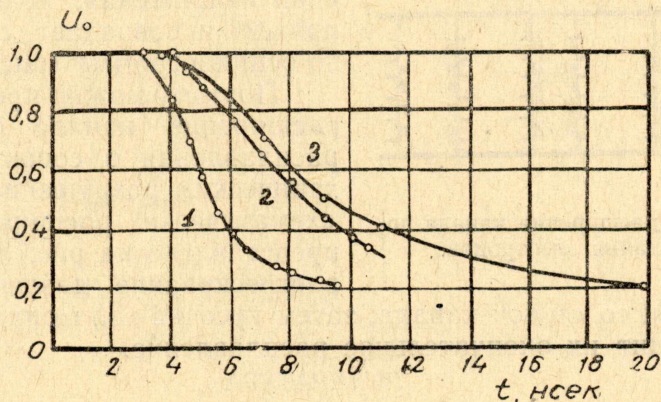


Рис. 4. Спад напряжения при пробое: 1 — спад только за счет расплавления, 2 — расплавление и механическое разрушение, 3 — спад напряжения по осциллограмме.

что время спада до уровня $0,2 U_{\text{макс}}$ равно 1 нсек. Следовательно, нельзя считать, что перегрев обуславливает более медленный спад напряжения.

Может быть, при высокой температуре канала энергия тратится на тепловое излучение.

Поток лучистой энергии в единицу времени [2]

$$\Phi_e = GT^4S,$$

где S — площадь,

T — температура,

$G = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ вт } \text{м}^{-2} \text{град}^{-4}$ — коэффициент.

При $T = 10^4 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Phi_e = 4,5 \text{ вт}$ или $3 \cdot 10^{-3} \%$ от энергии в канале. Таким образом, только малая доля энергии идет на излучение, и этим вариантом потери энергии нужно пренебречь.

Времена в наших исследованиях короткие, по осциллограмме спад напряжения происходит за 12 нсек. Если считать период высокочастотных колебаний $T = 25 \text{ нсек}$, то $f = 4 \cdot 10^7 \text{ гц}$ высока, и можно предполагать, что уменьшение спада сопротивления происходит за счет скин-эффекта. Проникая в проводящую среду, электромагнитное поле очень быстро затухает.

Глубина проникновения тока в проводник, при которой происходит уменьшение поля в e раз, подсчитывается по формуле [3].

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}},$$

где $\omega = 2\pi \cdot 4 \cdot 10^7 \text{ гц}$ — частота,

$\gamma = 3,3 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$ — проводимость,

$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$ — магнитная проницаемость.

При этом $\Delta = 0,5 \text{ мк}$. Скин-эффект сказывается в том случае, когда радиус канала $r \gg \Delta$. В данном случае наоборот, поэтому можно считать, что здесь скин-эффект не имеет места.

Таким образом, ни перегрев канала, ни излучение, ни скин-эффект не замедляют уменьшения сопротивления.

При рассмотрении каналов пробоя видно растрескивание диэлектриков вокруг канала, по-видимому, часть энергии идет на механическое разрушение. Если считать, что половина энергии идет на механическое разрушение, и определить при этом спад напряжения, то этот спад напряжения совпадает с измерением по осциллограмме (рис. 4).

Поэтому можно представить, что расширение канала идет за счет расплавления в совокупности с механическим разрушением. При этом схематически расширение канала представлено на рис. 5. Происходит растрескивание диэлектрика, отка-

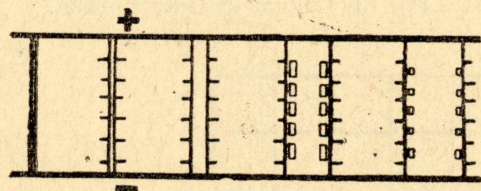


Рис. 5. Схема расширения канала после замыкания электродов.

лывание частиц со стенок канала, затем кусочки соли оплавляются, пока не происходит их окончательное расплавление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электротехническим материалам под ред. И. П. Богородицкого. Госэнергоиздат, 1960.
2. Н. И. Корякин, К. Н. Быстров, П. С. Киреев. Краткий справочник по физике, Москва, 1962.
3. В. А. Говорков. Электрические и магнитные поля. Госэнергоиздат, 1960.