

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДО НАСТУПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
РАЗРЯДА В ГОРНОЙ ПОРОДЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНОГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ**

А. А. ВОРОБЬЕВ, В. С. ДМИТРЕВСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной  
и кабельной техники)

В [1] была высказана гипотеза, что в диэлектрических горных породах земной коры могут накапливаться электрические заряды, создающие высокие электрические поля. При достижении локальным электрическим полем значения, равного электрической прочности среды, произойдет электрический разряд в породах, сопровождающийся выделением накопленной энергии в короткие промежутки времени.

Флюктуационная теория разрушения твердых тел [2] позволяет получить зависимость времени (долговечности) от значения величины напряжения, при которой развивался процесс разрушения. Причиной разрушения твердых материалов, согласно этой теории, являются тепловые флюктуации, т. е. локальные кратковременные повышения внутренней энергии, которые вызывают разрывы части химических связей в молекулах. В отсутствие внешней нагрузки при соблюдении равновесного состояния разорванные химические связи вновь рекомбинируют. Приложенное растягивающее напряжение нарушает термодинамическое равновесие в материале и создает возможность накопления числа разорванных связей. Всестороннее сжатие, уменьшая расстояние между атомами, благоприятствует восстановлению связей или, иными словами, повышает потенциальный барьер.

На основе флюктуационной теории разрушения твердых диэлектриков получена зависимость времени от пробоя диэлектрических материалов вообще и диэлектрических горных пород в частности [3] в виде

$$\tau = \tau_0 \frac{\exp \frac{D}{2kT}}{\left[ \exp \frac{V(A\beta E)^2 \pm \gamma^2 \sigma^2}{2kT} \ln \frac{2De}{V(A\beta E)^2 \pm \gamma^2 \sigma^2} \right]^{-1}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время до разрушения материала;

$\tau_0$  — время релаксации связей при термодинамическом равновесии;

$D$  — энергия диссоциации связей;

$T$  — абсолютная температура;

$k$  — постоянная Больцмана;

$A, \gamma$  — постоянные, зависящие от структуры диэлектрического материала;

$\beta$  — коэффициент, учитывающий концентрацию напряженности электрического поля в местах неоднородностей;

$E$  — средняя напряженность электрического поля;

$\sigma$  — механическое напряжение.

В уравнении (1) знак перед произведением  $\gamma^2\sigma^2$  берется плюс при наличии растягивающих напряжений и минус при всестороннем сжатии.

Изменение температуры с глубиной в земных недрах можно приближенно записать

$$T = T_0 + ah, \quad (2)$$

где  $T_0$  — температура на поверхности Земли;

$a$  — температурный градиент в земной коре;

$h$  — глубина залегания рассматриваемого слоя.

Механическое напряжение вследствие всестороннего сжатия в земных недрах приближенно можно выразить в виде

$$\sigma = bh. \quad (3)$$

Подставив значения  $T$  и  $\sigma$  в уравнение (1), получили

$$\tau = \tau_0 \frac{\exp \frac{D}{2\kappa(T_0 + ah)}}{\left[ \exp \frac{V(A\beta E)^2 - \gamma^2 b^2 h^2}{2\kappa(T_0 + ah)} \ln \frac{2De}{V(A\beta E)^2 - \gamma^2 b^2 h^2} \right]^{-1}}. \quad (4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что время до пробоя горной породы при данной напряженности электрического поля с глубиной изменяется по кривой с минимумом. Взяв производную  $\tau$  по  $h$  и приравняв ее нулю, нашли уравнение для определения значения  $h_m$ , соответствующее минимуму времени до пробоя горной породы на глубине в виде

$$\begin{aligned} \sqrt{(A\beta E)^2 - \gamma^2 b^2 h_m^2} &= \frac{T_0 + ah_m}{ah_m} \left( \frac{\gamma b h_m}{D} \right)^2 + \\ &+ \left[ \frac{(A\beta E)^2}{D} + \frac{T_0}{ah_m} \frac{(\gamma b h_m)^2}{D} \right] \ln \frac{2De}{V(A\beta E)^2 - (\gamma b h_m)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для горных пород приближенное значение коэффициентов, имеющих в уравнении (5), дано в табл. 1.

Таблица 1

$\frac{D}{\frac{дж}{св}}$	$\frac{A\beta}{\frac{дж}{св} \frac{м}{в}}$	$\frac{\gamma}{\frac{дж}{св} \frac{м^2}{н}}$	$\frac{b}{\frac{н}{м^2 км}}$	$\frac{a}{\frac{град}{км}}$	$T_0$ °К
$7,25 \cdot 10^{-19}$	$1,62 \cdot 10^{-25}$	$8,7 \cdot 10^{-29}$	$(1,2-2,4) \cdot 10^7$	10—30	300

Пользуясь уравнением (5), было найдено значение глубины  $h_m$  и определено при разных напряженностях электрического поля минимальное время до появления разряда в горной породе по выражению (4).

Значения  $h_m$  и времени до разряда в зависимости от напряженности электрического поля при разных значениях коэффициентов  $a$  и  $b$ , рассчитанные по уравнениям (4) и (5), даны в табл. 2.

Табл. 2 позволяет проследить влияние градиентов температур и давлений на минимальное время до пробоя диэлектрической породы.

С увеличением градиента температур и уменьшением градиента давлений растет значение  $h_m$ , т. е. глубина, в которой происходят разряды, и уменьшается время до пробоя. Наибольший интерес для оценки условий появления разрядов в земной коре представляют глубины 5—15 км.

На этих глубинах породы имеют наименьшую проводимость. По-видимому, именно в этих глубинах можно ожидать возникновения электрического поля наибольшей напряженности.

Из табл. 2 видно, что на этих глубинах время до разрядов в горных породах при градиентах температур  $30 \text{ град/км}$  и напряженностях поля  $10^5 \text{ в/м}$  может измеряться несколькими десятками секунд.

В приведенных расчетах учитывалось только петростатическое давление, которое повышает высоту потенциального барьера и препятствует развитию разряда. В горных породах за счет волновых процессов, например, из-за влияния притяжения Луны и Солнца, появляются растягивающие напряжения. Растягивающие напряжения могут возникать и при тектонических процессах.

Таблица 2

$\frac{E}{V}$ $\frac{1}{м}$	$a=10 \frac{\text{град}}{\text{км}}$		$a=30 \frac{\text{град}}{\text{км}}$		$a=10 \frac{\text{град}}{\text{км}}$		$a=30 \frac{\text{град}}{\text{км}}$	
	$b=2,4 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{м}^2 \text{ км}}$		$b=2,4 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{м}^2 \text{ км}}$		$b=1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{м}^2 \text{ км}}$		$b=1,2 \cdot 10^7 \frac{\text{н}}{\text{м}^2 \text{ км}}$	
	$h_m$ км	$\tau$ сек	$h_m$ км	$\tau$ сек	$h_m$ км	$\tau$ сек	$h_m$ км	$\tau$ сек
$10^4$	0,645	$10^{24}$	0,74	$4 \cdot 10^{22}$	1,45	$2,5 \cdot 10^{23}$	1,527	$4 \cdot 10^{20}$
$10^5$	6,65	$8 \cdot 10^{15}$	7,4	$5 \cdot 10^6$	14,4	$2,2 \cdot 10^{11}$	15	57,5
$10^6$	45	$6 \cdot 10^{-8}$	52,5	$4 \cdot 10^{-11}$	—	—	—	—

Растягивающие напряжения понижают потенциальный барьер и вызывают уменьшение времени до пробоя горной породы. При этом разряды в горных породах могут возникать при значительно меньших напряженностях электрического поля, чем дано в табл. 2.

Процесс пробоя породы в недрах будет ускоряться при повышении ее температуры, которое может иметь место, например, при подъеме магмы.

Высказанная гипотеза позволяет сделать некоторые предположения по прогнозированию начинающихся землетрясений, связанных с тектоническими процессами в земной коре.

Перед наступлением землетрясения следует ожидать локального повышения давления со стороны магмы на земную кору, которое повлечет за собой возникновение растягивающих напряжений в земной коре и повышение температуры в местах будущего землетрясения.

Появление механических растягивающих напряжений и повышение температуры приведет к резкому увеличению числа локальных разрядов в земной коре.

Каждый локальный разряд сопровождается выделением электромагнитной энергии. Установив достаточно чувствительные датчики электромагнитных волн, можно обнаружить начальные стадии разрядов в земной коре.

Так как разряды могут появиться задолго до начала землетрясения, то увеличение их интенсивности будет указывать на развивающийся электрический процесс в недрах, который может закончиться тектоническим.

Наблюдения, проведенные в Средней Азии и Камчатке, показали, что часто сейсмическим толчкам предшествовало возмущение электрического поля в атмосфере и земной коре.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев. К вопросу об инициировании землетрясений подземными грозовыми явлениями. Сб. «Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция». М., «Энергия», 1970.
  2. А. А. Тагер. Физико-химия полимеров. М., «Химия», 1968.
  3. В. И. Графов, А. А. Воробьев, В. С. Дмитриевский, В. И. Меркулов, В. А. Лхамжапов. Старение твердых диэлектриков и надежность электрической изоляции. Доклад на IV секции Научного совета АН СССР по электрофизическим проблемам электроэнергетики. Новосибирск, 1—3 декабря, 1970 .
-