

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВАНИЯ

*О. И. Кашуба, докт. техн. наук, Л. И. Скляр, канд. техн. наук,
А. Л. Скляр, инж. (МакНИИ)*

Розглянуто питання підвищення безвідмовності дії електричного способу підривання з використанням електродетонаторів з ніхромовими містками розжарювання. Виявлено, що при розрахунку загального електричного опору підривної мережі його необхідно збільшити на 24% від номіналу.

Взрывные приборы, используемые в системе электровзрывания, имеют ограничение как по общему электрическому сопротивлению взрывной цепи, состоящей из электродетонаторов, магистральных и соединительных проводов, так и по длительности разряда конденсатора во взрывную цепь, величина которого составляет 4,0 мс.

Для расчета электрического сопротивления электродетонаторов необходимо знать температуру материала мостиков накаливания за время, не превышающее время разряда конденсатора взрывного прибора.

В связи с этим представляется целесообразным провести теоретический расчет температуры в зависимости от времени в системе мостик накаливания–воспламенительный состав при прохождении через мостик электрического тока. Проблема сводится к решению задачи о зажигании пиротехнического состава накаливаемым телом.

В данном случае хорошим приближением может быть цилиндрическая симметрия. Ось цилиндрической системы совместима с осью симметрии внутреннего цилиндра (мостик накаливания) радиуса r_0 , окруженного внешним цилиндром (воспламенительный состав) радиуса R_0 .

Удельная скорость выделения тепла в объеме внутреннего цилиндра при прохождении по нему электрического тока определяется из выражения

$$W_j(T) = \frac{U^2}{\pi r_0 l R_t(T)}, \quad (1)$$

где U – напряжение на мостике накаливания; R_t – сопротивление мостика накаливания как функция температуры; l – длина мостика; r_0 – диаметр мостика; T – температура мостика.

В начальный момент времени температура воспламенительного состава и мостика накаливания – T_n . Величины, характеризующие теплофизические свойства (теплопроводность, теплоемкость, плотность) находящихся в контакте тел, химическую реакцию (энергия активации, тепловой эффект реакции, предэкспонент) в веществе в ходе процесса, принимаются постоянными.

Математическая задача сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

распространения тепла в мостике накаливания

$$c_1 p_1 \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\lambda}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \frac{\partial T_i}{\partial r} \right] + W_j(T_i); \quad 0 < r < r^0; \quad (2)$$

распространения тепла в воспламенительном составе

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + Q \frac{\partial a}{\partial t}; \quad r_0 < r < R^0, \quad (3)$$

скорости химической реакции

$$\frac{\partial a}{\partial t} = (-a) k_0 \exp \left(\frac{E_a}{-RT_2} \right), \quad 0 \leq a \leq 1. \quad (4)$$

Начальные и граничные условия:

$$T_1(r, 0) = T_2(r, 0) = T_a; \quad a(r, 0) = 1; \quad T_2(R_0, t) = T_H; \quad a(R_0, t) = 1; \quad \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 0; \quad T_1(r_0, t) = T_2(r_0, t),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r}, \quad (5)$$

где r – координата; t – время протекания тока; Q – тепловой эффект реакции; E_a – энергия активации; K_0 – предэкспонент; λ , c , ρ – коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности соответственно; T_H – начальная температура; a – степень разложения воспламенительного состава; индекс «1» относится к мостику накаливания, индекс «2» – к воспламенительному составу.

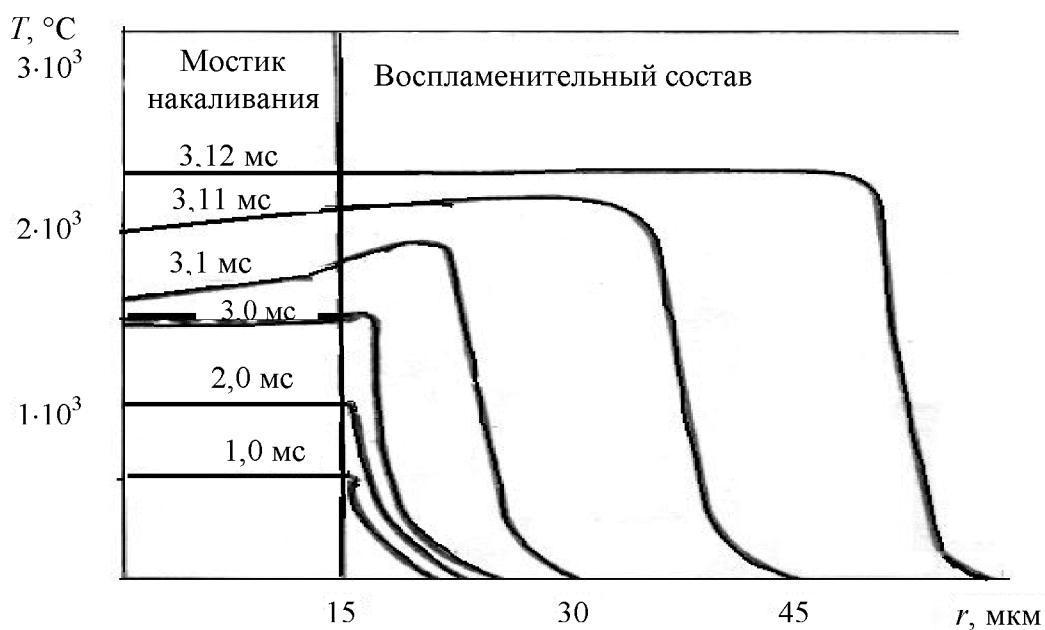
Уравнения теплопроводности (2), (3) записаны в общем виде для плоской, цилиндрической и сферической симметрии. Соответственно для этих симметрий показатель формы равняется $n = 0, 1, 2$. В системе уравнений (5)

выражение: $\frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial t}$ отражает условие симметрии задачи, а два последних

уравнения – условие идеального теплового контакта.

Уравнения (2–4) представляют собой систему нелинейных уравнений относительно температуры, которая была решена с помощью разностных схем на трехточечном шаблоне [1]. Численные уравнения решались методом прогонки. При расчете использовались следующие характеристики: $\rho = 8,6 \text{ г/см}^3$, $c_1 = 0,8 \text{ Дж(м} \cdot \text{°C)}$, $\lambda_1 = 0,68 \text{ Вт(см} \cdot \text{K)}$, $\rho_2 = 3 \text{ г/см}^3$, $c_2 = 1,3 \text{ Дж(м} \cdot \text{°C)}$, $\lambda_2 = 1,6 \cdot 10^3 \text{ Вт(см} \cdot \text{K)}$, $n = 1$. Количество теплоты, выделяющейся при реакции горения, $Q = 9736 \text{ кДж}$ [2]. Химическое разложение воспламенительного состава описывается уравнением Аррениуса с параметрами $K_0 = 10^{16} \text{ C}^{-1}$, $E_a = 37000 \text{ кал/моль}$ [3]. Время прохождения тока по мостику накаливания принималось $t = 4 \text{ мс}$, длина мостика накаливания $l = 0,1 \text{ см}$, радиус мостика накаливания $r = 15 \text{ мкм}$, температурный коэффициент электрического сопротивления нихрома $\beta = 0,0001 \text{ °C}^{-1}$, электрическое сопротивление мостика накаливания при нормальной температуре – 2 Ом. В расчетах рассматривалась область радиуса $R_0 = 100 \text{ мкм}$, так как рассмотрение всей области системы не имело смысла. Это позволило уменьшить число счетных точек по координате.

Программа расчета была реализована на языке «Фортран». Результаты расчетов представлены на рисунке.



Распределение температуры в системе мостик накаливания–воспламенительный состав в зависимости от времени

Графики температуры помечены цифрами, которые обозначают время, выраженное в миллисекундах. Видно, что с третьей миллисекунды начинается тепловыделение за счет химической реакции. При этом тепло поступает от воспламенительного состава к мостику. Формирование волны горения происходит значительно быстрее, чем выравнивание температуры в нихроме. Тем не менее, большие градиенты температуры убыстряют процесс теплообмена, что приводит к нагреву нихромового мостика до температуры горения воспламенительного состава.

Расчет показывает, что химическое разложение воспламенительного состава приводит к разогреванию мостика накаливания до температуры продуктов горения за время меньшее, чем время подачи тока на мостик накаливания.

Принимая во внимание, что температура нихромового материала мостика накаливания в момент прохождения по нему тока равна температуре горения воспламенительного состава (роданистый свинец, хлорат калия, свинцовый сурик и нитролак), удельное электрическое сопротивление электродетонаторов с нихромовыми мостиками накаливания возрастает на 24% от номинального значения и его необходимо учитывать при расчете общего электрического сопротивления электровзрывных цепей.

1. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 653 с.
2. Кашуба О. И. О расчете общего электрического сопротивления электровзрывной сети системы электровзрывания // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – Макеевка, Донбасс, 1994. – С. 56–60.
3. Беляев А. Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. – М.: Наука, 1968. – 253 с.