УДК 622.232

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВАНИЯ ЗАРЯДОВ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

О. И. Кашуба, докт. техн. наук (МакНИИ), В. Д. Воробьев, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»)

Наведено результати розрахунків характеристик електродетонаторів для забезпечення безвідмовності підривання шпурових зарядів на вугільних шахтах, небезпечних по газу і пилу.

Ключові слова: безпека, вибух, заряд, шахта, шпур, електродетонатор.

Приведены результаты расчетов характеристик электродетонаторов для обеспечения безотказности взрывания шпуровых зарядов на угольных шахтах, опасных по газу и пыли.

Ключевые слова: безопасность, взрыв, заряд, шахта, шпур, электродетонатор.

Results of performance calculations of electric caps to provide the failure-proof blast firing in hazardous gas and dust coal mines are presented.

Keywords: safety, explosion, charge, mine, blast hole, electric cap.

Введение. На угольных шахтах Украины, опасных по газу и пыли, единственным допущенным к применению способом взрывания шпуровых зарядов взрывчатых веществ (ВВ) является электрический. Для его осуществления используют взрывные приборы, электродетонаторы (ЭД), магистральные и соединительные провода. Установлено [1, 2], что классическим условием безотказности группового взрывания ЭД, согласно [3], является их последовательное соединение. При этом время срабатывания воспламенительного состава (ВС) наиболее чувствительного ЭД в группе не должно превышать времени воспламенения ВС наименее чувствительного ЭД в данной группе. Однако применительно к ЭД с нихромовым мостиком накаливания это условие безотказности взрывания ЭД не выполняется. Поэтому проведение исследований с обоснованием эффективности взрывания ЭД данного типа представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Цель работы – обоснование безотказного электрического способа взрывания зарядов с применением ЭД с нихромовым мостиком накаливания в условиях угольных шахт, опасных по газу и пыли.

Изложение материала исследования. Экспериментально установлено [1, 2], что причиной невыполнения классического условия безотказности группового взрывания шпуровых зарядов при отработке угольных пластов в шахтах является прирост электрического сопротивления мостиков накаливания в ЭД. Это происходит за счет нагревания мостиков в момент прохождения по ним электрического тока и горения ВС. Кроме того, применяемые на практике взрывные приборы ПИВ-100М и КВП1/100 имеют ограничения по общему электрическому сопротивлению взрывной цепи, включающей ЭД, магистральные и соединительные провода.

Общее электрическое сопротивление взрывной цепи $R_{вц}$ рассчитывается по формуле

$$R_{вц} = R_{эд}N + 2L_{м}R_{м} + L_{с}R_{с},$$

где $R_{эд}$ – электрическое сопротивление электродетонатора; N – количество электродетонаторов; $R_{м}$ и $R_{с}$ – электрическое сопротивление 1 м магистрального и соединительного проводов; $L_{м}$ и $L_{с}$ – длина магистральных и соединительных проводов.

Практика показала, что при взрывании большого количества последовательно соединенных шпуровых зарядов ВВ (70 и более) часть из них отказывает, а при повторном подсоединении они взрываются безотказно. Это приводит к нарушению технологического цикла процесса, снижению эффективности и безопасности взрывных работ в шахтах.

Результаты экспериментальных исследований по установлению причин отказов шпуровых зарядов ВВ, взрываемых в больших группах, выявили [4], что причина отказов – падение тока в цепи в момент взрывания вследствие прироста электрического сопротивления ЭД.

Известно [3], что удельное электрическое сопротивление ЭД в зависимости от температуры R_t их мостиков накаливания можно рассчитать по следующей формуле:

$$R_t = R_0\left(1 + \gamma T\right),$$

где R_0 – сопротивление мостика накаливания ЭД при нормальной температуре; β – температурный коэффициент электрического сопротивления материала мостика накаливания; T – температура мостика накаливания в момент горения ВС.

Однако в работе [3] изменением удельного электрического сопротивления мостиков накаливания промышленных ЭД с нихромовым мостиком накаливания пренебрегают и исходят из того, что $R_t = R_0$, а это приводит к неправильным теоретическим выводам и расчетам безотказных параметров системы электровзрывания.

Для расчета электрического сопротивления мостиков накаливания ЭД в момент их срабатывания необходимо знать температуру этих мостиков. Поскольку мостик накаливания окружен со всех сторон ВС, масса которого в несколько десятков раз больше, чем масса мостика накаливания, и процесс горения идет в закрытом объеме (внутри гильзы ЭД), то можно считать, что температура мостиков накаливания равна температуре горения ВС $T_{вц}$, которая определяется по формуле [5]

$$T_{вс} = \frac{Q_{рг} - \sum\left(Q_S + Q_K\right)}{\sum C_P},$$

где $Q_{рг}$ – количество теплоты, выделившейся при реакции горения; $\sum C_P$ – суммарная теплоемкость продуктов реакции; Q_S – скрытая теплота плавления; Q_K – скрытая теплота испарения.

Расчет величины $T_{вс}$ проводится на основании закона Гесса [5], из которого следует, что теплота образования из элементов продуктов горения ВС будет равна сумме теплот образования его компонентов, к которой следует добавить количество тепла, выделеляющееся при горении. Следовательно, теплоту реакции горения ВС можно определить как разность между теплотой образования продуктов горения и теплотой образования компонентов состава:

$$Q_{рг} = Q_{пр} - Q_{ис},$$

где $Q_{пр}$ – теплота образования продуктов горения; $Q_{ис}$ – теплота образования исходных компонентов ВС.

Уравнение реакции горения ВС имеет следующий вид:

$$0,24Pb_2O_4 + 0,1C_{24}H_{31}(ONO_2)_9O_{11} + 10,7Pb(CNS)_2 + 20,5KClO_3 \rightarrow$$
$$\rightarrow 11,42Pb + 20,5KCl + 11,15N_2 + 1,55H_2O + 21,4SO_2 + 21,91CO + 1,89C.$$

В качестве примера, с использованием стандартных значений теплоты образования веществ из элементов, приведенных в работах [5, 6], рассчитаны величины $Q_{пр}$ (18199 кДж) и $Q_{ис}$ (8162,9 кДж). Отсюда теплота горения ВС:

$$Q = Q_{пр} - Q_{ис} = 18199 - 8462,9 = 9736,1 \text{ кДж}.$$

Предполагая, что температура горения будет около 2500 °С и принимая во внимание скрытые теплоты плавления и кипения, значения которых указаны в работах [5, 6], получим:

$$Pb - Q_S + Q_K = 1,22 \cdot 4,1867 + 43 \cdot 4,1867 = 185 \text{ кДж};$$

$$KCl - Q_S + Q_K = 6,3 \cdot 4,1867 + 40 \cdot 4,1867 = 194 \text{ кДж}.$$

Следовательно, сумма скрытых теплот плавления и кипения продуктов горения ВС будет равна 379 кДж.

Поскольку при горении ВС, нанесенного на мостики накаливания промышленных ЭД, давление в гильзах ЭД не превышает 20 МПа, то для расчета температуры горения ВС использованы значения теплоемкостей продуктов горения при постоянном давлении, приведенные в работе [5]. При этом теплоемкость продуктов реакции горения равна 3468,4 Дж/К, а температура горения ВС, нанесенного на мостик накаливания ЭД – 2425 °С.

Исходя из того, что температура материала мостиков накаливания в момент горения ВС равна температуре его горения, рассчитано удельное электрическое сопротивление ЭД R_t при срабатывании:

$$R_t = R_0(1 + \quad T) = R_0\left(+ \cdot \quad ^{-4} \cdot \quad \right) = \quad R_0$$

Анализ расчетов показал, что удельное сопротивление ЭД с нихромовыми мостиками накаливания во время его взрывания возрастает на 24 % от

номинального значения, что согласуется с экспериментальными данными [1, 2].

Важным условием является установление температуры мостиков накаливания промышленных ЭД в зависимости от длительности подачи на него тока и горения ВС. Расчет параметров теплофизической модели «мостик накаливания–ВС» выполнен решением следующей системы дифференциальных уравнений:

распространения тепла в мостике накаливания

$$C_1 p_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r^n} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left[r^n \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + W_j(T_1);\ \ 0 \prec r \prec r_0;$$

распространения тепла в воспламенительном составе

$$C_2 p_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r^n} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left[r^n \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + Q \frac{\partial a}{\partial t};\ \ \ r_0 \prec r \prec R_0;$$

скорости химической реакции

$$\frac{\partial a}{\partial t} = (-a) K_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R T_2} \right];\quad 0 \le a \le 1;$$

удельной скорости выделения тепла в мостике накаливания при прохождении по нему тока

$$W_j(T) = U^2 / \left[\ r_0^2 l R_t \grave{} T \acute{} \right].$$

Начальные и граничные условия:

$$T_1(r,0) = T_2(r,0) = T_{i};\ a(r,0) = 1;\ T_2(R_0,t) = T_{i};$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0,t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T 2_1(r_0,t)}{\partial r},$$

где r – координата; t – время протекания тока; E_a – энергия активации; Q – тепловой эффект реакции; K_0 – предэкспоненциальный множитель (коэффициент пропорциональности); $T_н$ – начальная температура; a – степень разложения пиротехнического состава; n – показатель формы симметрии; λ, C, ρ – коэффициенты соответственно теплопроводности, теплоемкости и плотности; U – напряжение на мостике накаливания; l – длина мостика; $R_t(T)$ – сопротивление мостика как функция температуры (индекс 1 относится к мостику накаливания, индекс 2 – к ВС).

При расчете использовались следующие характеристики мостика накаливания: ρ_1 = 8,6 г/см^3; C_1 = 0,8 Дж/(г·К); λ_1 = 0,68 Вт/(см·К); масса ВС ρ_2 = 3 г/см^3; C_2 = 1,3 Дж/(г·К); λ_2 = 1,6·10^3 Вт/(см·К); n = 1 для цилиндрической симметрии.

Количество теплоты, выделяющейся при реакции горения Q = 9736 кДж. Химическое разложение пиротехнической смеси ВС описывается уравнением Аррениуса со следующими параметрами: $K_0 = 10^{16}$ С$^{-1}$, E_a = 37000 кал/моль [7]. Время прохождения тока по мостику накаливания принималось t = 4 мс, его длина l = 0,1 см, радиус r = 15 мкм, температурный коэффициент электрического сопротивления нихрома β = 0,0001 °С$^{-1}$, электрическое сопротивление при нормальной температуре R_0 = 2 Ом.

Система уравнений была решена с помощью разностных схем на трехточечном шаблоне [8] с помощью компьютерной программы. Анализ результатов расчета показал, что начиная со второй миллисекунды, тепло поступает от ВС к мостику накаливания. При этом формирование волны горения происходит значительно быстрее, чем выравнивание температуры в мостике накаливания. Тем не менее большие градиенты температуры ускоряют процесс теплообмена, что приводит к нагреву мостика накаливания до температуры горения ВС за 3 мс. Химическое разложение ВС приводит к нагреву мостика накаливания до температуры его горения за время, которое меньше, чем время подачи тока от взрывного прибора на мостики ЭД. Принимая во внимание, что температура материала мостиков накаливания при прохождении по ним тока равна температуре горения ВС, можно рассчитать удельное электрическое сопротивление ЭД в момент его взрывания: $R_t(T) = 1,24R_0$, которое необходимо учитывать при расчете общего электрического сопротивления электровзрывной цепи:

$$R_{\text{вц}} = KR_{\text{эд}}N + 2L_{\text{м}}R_{\text{м}} + L_{\text{с}}R_{\text{с}}.$$

Выводы. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что для ЭД с нихромовыми мостиками накаливания диаметром 30 мкм и штатным ВС прирост электрического сопротивления является постоянным, а коэффициент K = 1,24.

Повышение безотказности электрического способа взрывания зарядов ВВ с использованием ЭД с металлическими мостиками накаливания достигается за счет введения дополнительного коэффициента K при расчете допустимого общего сопротивления взрывной цепи.

1. *Кушнарев П. И.* Исследование условий безотказного взрывания электродетонаторов/ П. И. Кушнарев, Н. Д. Толстых, О. И. Кашуба // Способы и средства безопосного ведения взрывных работ, совершенствование проветривания угольных шахт // Тр. МакНИИ. – 1980. – С. 7–12.

2. *Кашуба О. И.* О выполнении безотказного группового взрывания электродетонаторов/ О. И. Кашуба // Снижение травматизма при взрывных работах в шахтах // Тр. МакНИИ. – 1987. – С. 20–24.

3. *Лурье А. И.* Электрическое взрывание зарядов / А. И. Лурье. – М.: Недра, 1973. – 267 с.

4. *Кашуба О. И.* О расчете общего электрического сопротивления электровзрывной сети системы электровзрывания / О. И. Кашуба // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах // Тр. МакНИИ. – 1994. – С. 29–36.

5. *Шидловский А. А.* Основы пиротехники / А. А Шидловский. – М.: Машиностроение, 1964. – 338 с.

6. *Андреев К. К.* Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.

7. *Беляев А. Ф.* Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем / А. Ф. Беляев. – М.: Наука, 1968. – 283 с.

8. *Самарский А. А.* Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 311 с.

Надійшла до редакції 6.11.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н. проф. В. П. Розеном