

УДК 621.316.9

З.М. Иохельсон, д-р техн. наук, О.И. Кашуба, д-р техн. наук,  
И.А. Бершадский, канд. техн. наук

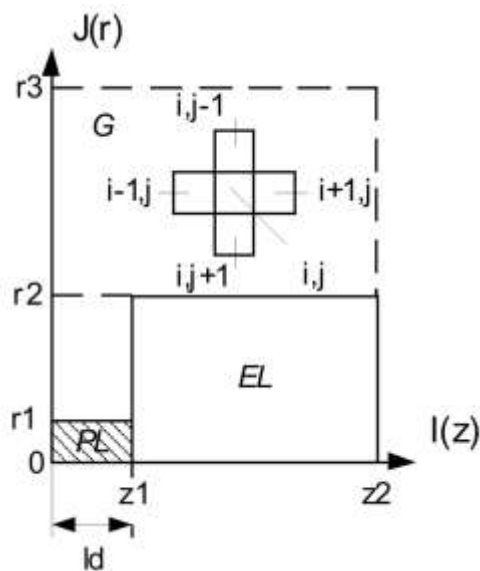
## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ В ШАХТАХ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСКР РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Представлены результаты математического моделирования электрического зажигания метано-воздушной смеси от искрового источника в виде цилиндра с учетом температуры очага разряда, его размеров и средней мощности, зависимости теплофизических параметров газовой среды от температуры, а также влияния электродов на формирование фронта пламени. Показано, что при увеличении диаметра электродов и уменьшения межконтактного расстояния при одном и том же времени существования разряда (100 мкс) возрастает минимальная энергия зажигания.

В связи со значительным развитием средств автоматизации и связи в отраслях промышленности, где возможно возникновение взрывчатых смесей газов, паров и пыли, все более широкое применение находит искробезопасное электрооборудование. В шахтных системах автоматики, сигнализации, связи, средствах управления и контроля совершенствование в части обеспечения искробезопасности является актуальной задачей, так как позволяет увеличивать мощности электрических цепей и реализовывать этот вид взрывозащиты для прогрессивных систем автоматики [1].

Несмотря на успешное решение ряда практических задач обеспечения искробезопасности в угольной промышленности, до настоящего времени не создана такая теория процесса электрического зажигания взрывоопасной смеси, которая позволила бы создать совершенные методы оценки и расчета безопасных параметров цепей. Так, на стадии проектирования важно знать, какие факторы существенно влияют на электрическое зажигание рудничной атмосферы. Для этого необходимо предложить математическую модель, связывающую параметры искрообразующего механизма и удельную объемную мощность искрового разряда.

В ряде исследований [2, 3] столб разряда рассматривается в виде цилиндрической трубки. При этом пренебрегают механической инерцией плазмы и макроскопическим движением в радиальном направлении. При размыкании электродов предполагается, что задача имеет ось и плоскость симметрии, перпендикулярную этой оси, то есть рассматривается один квадрант плоскости моделирования (рисунок 1).



*PL* – ствол разряда;  
*EL* – электрод;  
*G* – горючая газовая смесь.

Рисунок 1 – Аппроксимация моделируемого пространства

Для разработки модели электрического зажигания газовой смеси может быть использовано следующее дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T)\nabla^2 T + q(z, r, T, \eta) + P_0(t, z, r, T), \quad (1)$$

где  $q$  – мощность теплового источника экзотермической реакции;  
 $\eta$  – доля выгоревшего метана по отношению к его начальной концентрации;  
 $P_0$  – удельная объемная мощность искрового разряда;  
 $c, \rho, \lambda$  – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности газовой смеси;  
 $T$  – температура газовой среды в точке пространства, окружающей или принадлежащей стволу электрического разряда.

Воспользовавшись формулами для представления этого уравнения в цилиндрической системе координат  $(z, r)$  получим:

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{k+1} = & T_{i,j}^k + \frac{\tau}{j\Delta r^2} a(T_{i,j}^m)(T_{i,j+1}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}) + q(i\Delta_z, j\Delta_r, T_{i,j}^m, \eta_{i,j}, k\tau)\tau + \\ & + \frac{\tau}{\Delta_r^2} [a(T_{i,j-1}^m)(T_{i,j-1}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}) - a(T_{i,j+1}^{k+1})(T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j+1}^{k+1})] + \\ & + \frac{\tau}{\Delta_z^2} [a(T_{i-1,j}^m)(T_{i-1,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1}) - a(T_{i+1,j}^{k+1})(T_{i,j}^{k+1} - T_{i+1,j}^{k+1})], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $i, j$  – номера координат по оси  $z$  и радиусу  $r$ ;  
 $\tau$  – шаг по времени (определяется, исходя из условий устойчивости и монотонности разностного решения задачи [4]);  
 $\Delta_r, \Delta_z$  – шаг по радиусу и оси цилиндрической системы координат;  
 $a(T)$  – коэффициент температуропроводности;  
 $m = k, k+1$  – номер временного слоя, который определяет температуры для расчета коэффициентов уравнения;  
 $q$  – функция источника, учитывающая одновременное выделение тепла в экзотермической реакции и плазме дуги.

Для решения двухмерной задачи используется «экономичная» локально-одномерная схема с расщеплением по отдельным координатам  $z, r$ . Наиболее эффективно применение нелинейной разностной схемы [4], что позволяет увеличить шаг по времени  $\tau$  с 0,25 до 4 мкс при сохранении точности расчетов.

В процессе развития ядра пламени происходит изменение температуры газа и соответствующее изменение объема очага. Чтобы учесть это явление взрывоопасная газовая смесь рассматривается как идеальный газ, для которого  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ , где  $p, V, T$  – давление, объем, температура соответственно) [5], и вводится, согласно [5], относительная объемная концентрация одного из реагирующих компонентов:

$$x^* = \frac{x}{x_0}, \quad (3)$$

где  $x, x_0$  – мгновенная и начальная абсолютные объемные концентрации.

Тогда при допущении  $p = \text{const}$ :

$$x_1^* T_1 = x_2^* T_2, \quad (4)$$

где  $x_1^*, x_2^*$  – значения  $x^*$  при  $T_1$  и  $T_2$ .

В разностной форме (4) примет вид:

$$\begin{aligned} x^*T &= (x^* + \Delta x^*)(T + \Delta T); \\ x^* \Delta T + \Delta x^*T + \Delta x^* \Delta T &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

где  $\Delta x^* = x_2^* - x_1^*$  – изменение относительной концентрации при изменении  $T$  на  $\Delta T = T_1 - T_2$ .

Пренебрегая третьим слагаемым:

$$\frac{\partial x^*}{\partial T} = -\frac{x^*}{T} \text{ или } \frac{\partial \eta}{\partial T} = \frac{1-\eta}{T}, \tag{6}$$

где  $\eta = 1 - x^*$  – доля использованного (выгоревшего) компонента.

Уравнение (6), записанное в разностной форме:

$$\eta_{k+1} = \eta_k + \frac{\Psi(1-\eta_{k+1})(T_{k+1}-T_k)}{T_{k+1}} = \frac{\eta_k + \frac{\Psi}{T_{k+1}}(T_{k+1}-T_k)}{1 + \frac{\Psi}{T_{k+1}}(T_{k+1}-T_k)}, \tag{7}$$

где  $\psi$  – константа, учитывающая конечность скорости движения газа ( $\psi = 0,325$ ) [5];

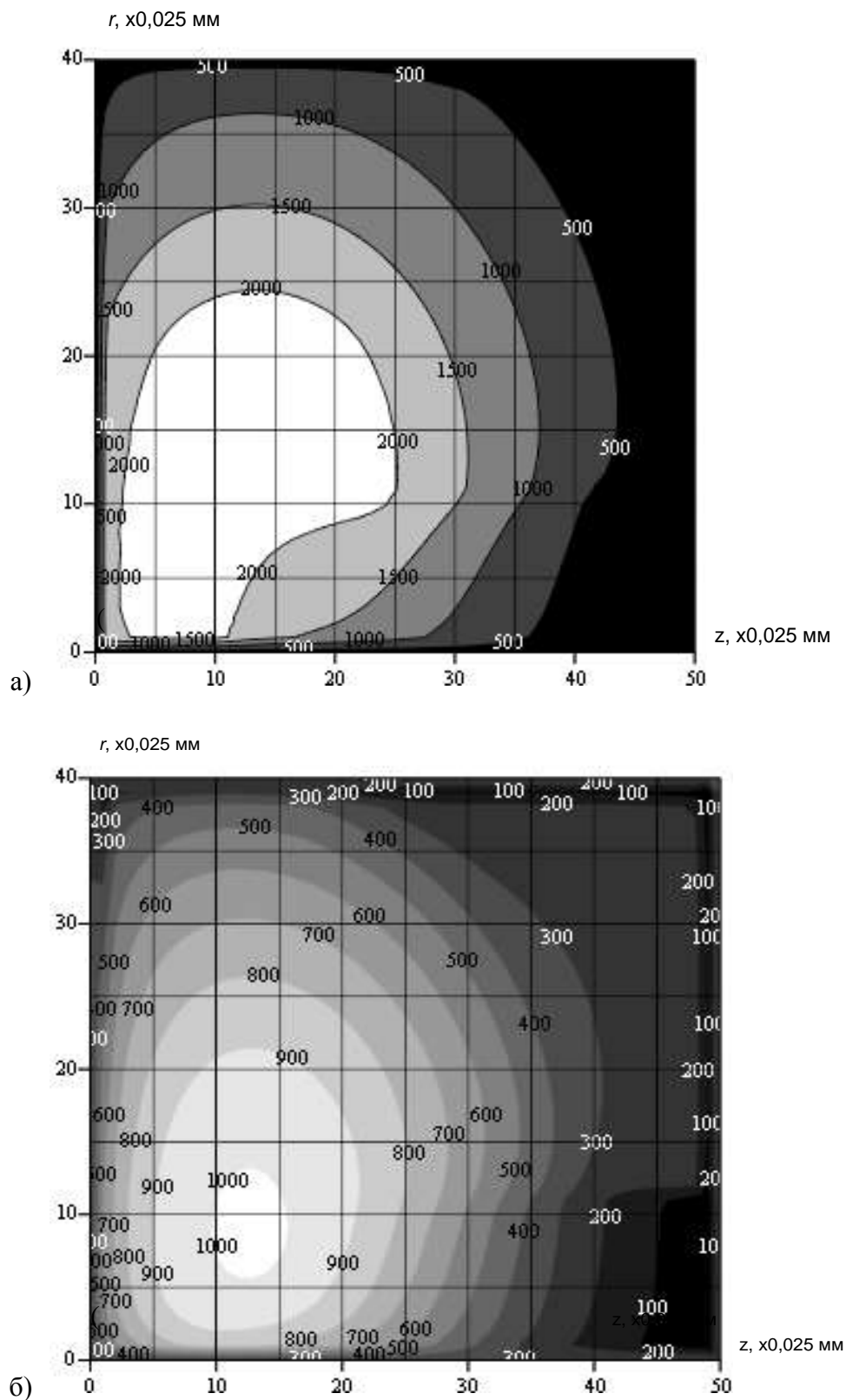
$k$  – номер текущего шага по времени.

Температура пламени, характеризующая опасный и безопасный процесс искрообразования, просчитывается с использованием рассмотренной выше модели (2, 7). Начальные размеры и температура очага определяются по методике [2, 6] на основе модифицированного метода «источников». Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные параметры теплового источника зажигания

Мощность теплового источника $P_0$ , Вт	Температура в центре очага $T$ , К		Критический радиус $r_1$ , мм	
	$z_1 = 0,25/2$ , мм	$z_1 = 0,5/2$ , мм	$z_1 = 0,25/2$ , мм	$z_1 = 0,5/2$ , мм
2,4	1008	1060	0,035	0,045
2,5	1050	1104	0,038	0,048
10	1782	1885	0,075	0,098
15	2161	2206	0,097	0,11
20	2458	2599	0,1	0,13

Для оценки изменения агрессивности разряда под действием электродов рассматривается влияние их диаметра и длины межконтактного промежутка на энергию зажигания. На рисунке 2а показан случай возникновения устойчивого фронта пламени, а на рисунке 2б – разрушение очага воспламенения (размеры и энергии разрядов указаны в пояснениях к рисунку 2). Энергия зажигания изменяется также из-за влияния радиуса электродов  $r_2$  и межконтактного расстояния  $z_1$  (рисунок 3).



- а) время существования источника –  $t_p = 100$  мкс, мощность источника –  $P_0 = 5$  Вт,  $r_1 = 0,13$  мм,  $r_2 = 0,25$  мм,  $r_3 = 1$  мм,  $z_1 = 0,25$  мм,  $z_2 = 1,25$  мм; время наблюдения – 500 мкс (устойчивый фронт пламени возник);  
 б)  $P_0 = 2,5$  Вт, остальные параметры – те же, что в случае а) (разрушение фронта пламени).

Рисунок 2 – Распространение фронта пламени при зажигании метано-воздушной смеси (область с электродом)

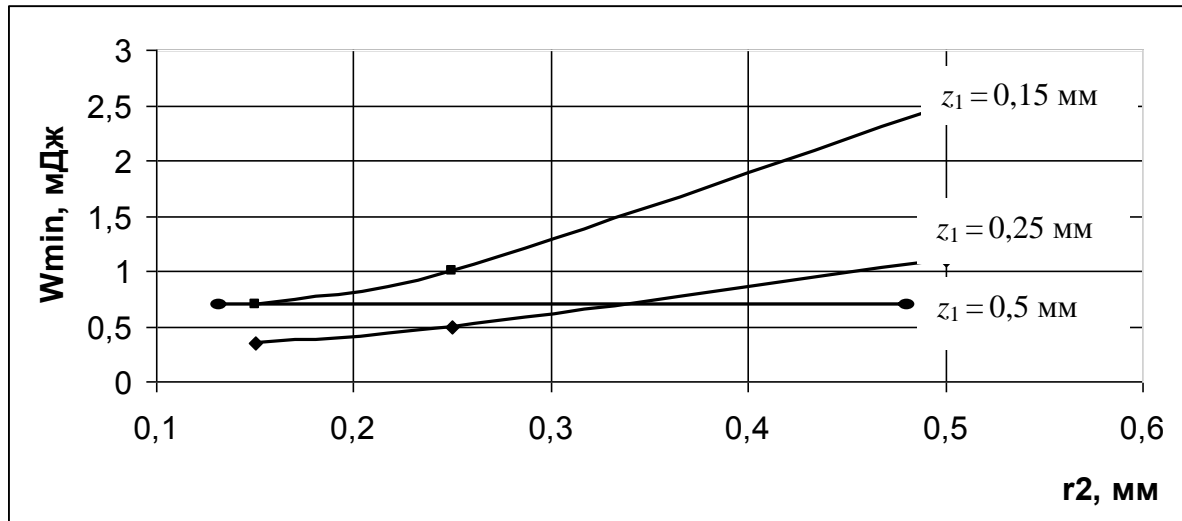


Рисунок 3 – Залежність енергії зажегання МВС від радіуса електрода і міжконтактного відстані

### Висновки

1. До цього часу не розроблена методика, що дозволяє здійснювати надійну оцінку іскробезпечності електричних кіл на стадії проектування рудничного електрообладнання.

2. Отримані в розглядаваній роботі аналітичні зв'язки основних факторів, що впливають на запалення рудничного газу електричною іскрою, дозволяють розробити розрахункові методи адекватної оцінки іскробезпечності рудничного електрообладнання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коган Э.Г. Способы и средства обеспечения искробезопасности рудничного электрооборудования. – М.: Недра, 1988. – 101 с.
2. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 424 с.
3. Крижанский С.М. К теории вольтамперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления // Журнал технической физики. – 1965. – Т XXXV, в. 10. – С. 1882–1888.
4. Дульнев Г.Н. и др. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
5. Коган А.Г. Электроизмерительная и расчетная оценка искробезопасности индуктивных электрических цепей на основе математической модели очагового зажигания рудничных газов: Автореф. дис... к. т. н. – Макеевка: МакНИИ, 1988.
6. Бершадский И.А., Клименко М.С., Иохельсон З.М. Сферическая модель воспламенения электрической искрой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». Вип. 112. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 126–131.