

УДК 622.822.7

*С. П. Греков, д-р техн. наук, И.Н. Зинченко, канд. техн. наук, В.З. Брюм***ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА НА ИСХОДЯЩИХ СТРУЯХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Проведен непрерывный контроль пожароопасного состояния горных выработок, разработана методика расчёта параметров пожара по данным оксидов углерода, кислорода, температуры и расхода воздуха на исходящей вентиляционной струе на каждый момент времени.

*Ключевые слова:* пожар, датчики контроля, исходящая струя, оксиды углерода, кислород, скорость воздуха, температура, зона горения, местонахождения пожара, расчёт, прогноз.

*S. Greeks, Doc. of Sc. (Eng.), I. Zinchenko, Cand. of Sc. (Eng.), V. Bryum***FIRE WEATHER PARAMETERS ACCORDING TO MONITORING THE CASTING IN MINES**

Conducted continuous monitoring of mine tunnel fire risk, the method of calculation of fire parameters according to oxides of carbon, oxygen, temperature and air flow on the outgoing air flow at any given time.

*Keywords:* fire control sensors , outgoing jet , oxides of carbon , oxygen, air velocity , temperature, combustion zone , the location of fire, payment forecast.

Для подсистемы «УТАС», предназначенной для непрерывного контроля пожароопасного состояния горных выработок, разработана методика расчёта параметров пожара по данным оксидов углерода, кислорода, температуры и расхода воздуха на исходящей вентиляционной струе на каждый момент времени. Это даёт возможность получать полную информацию о пожаре и принимать меры по его ликвидации.

Основными требованиями к современным способам и средствам обнаружения ранней стадии развития эндогенных и экзогенных пожаров в угольных шахтах является правильное размещение датчиков пожарных газов в горных выработках, исключение ложного их срабатывания, мгновенное поступление информации на диспетчерский пункт.

Этой цели служит подсистема противопожарной защиты подземных объектов шахты унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами (подсистема УТАС «ПОЖАР»). Подсистема «УТАС» предназначена для непрерывного измерения параметров пожаробезопасного состояния промышленных и горно-технологических объектов, в том числе параметров шахтной атмосферы, состояния основного и технологического оборудования, а также систем автоматического пожаротушения, передачи информации на диспетчерский пункт, ее обработки и отображения. При этом необходимо не только обнаружить пожар, но и дать прогноз его состояния, температуры, местонахождения пожара, длины зоны горения по данным мониторинга оксидов углерода, кислорода и скорости воздуха на исходящей вентиляционной струе.

Для прогноза стадии развития пожара представим уравнение динамики температуры в зоне горения в виде [1]

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha \Pi}{S} (T_c - T) + q, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газов, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $T$  – температура в очаге пожара, К;  $T_0$  – температура до пожара, К;  $T_c$  – температура стенок выработки, К;  $u$  – скорость движения воздуха, м/с;  $l$  – длина зоны горения, м;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена смеси газов со стенками выработки, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $\Pi$  – периметр выработки, м;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $q$  – интенсивность источника тепла при горении, Вт/м<sup>3</sup>.

Для квазистационарного случая уравнение (1) примет вид

$$\tilde{u} \frac{T - T_0}{l} = \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 c S} (T_c - T) + q / \rho_0 c, \quad (2)$$

где  $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$  – массовая скорость воздуха, м/с.

Упростим вид уравнения (2), принимая  $T_c = T_0$ , и получим

$$(\tilde{u} + \bar{\alpha})(T / T_0 - 1) = \bar{q} l, \quad (3)$$

где  $\bar{\alpha} = \frac{\alpha \Pi}{c \rho_0 S}$  – удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки, м/с;  $\bar{q} = \frac{q}{c \rho_0 T_0}$

– удельная интенсивность тепловыделения в зоне горения, 1/с.

Разрешая уравнение (3) относительно температуры, получим

$$T = T_0 \left( 1 + \frac{\bar{q} l}{\tilde{u} + \bar{\alpha}} \right). \quad (4)$$

Для расчёта интенсивности тепловыделения в единице объёма введём в рассмотрение функцию [2]

$$q = 0,01(C_0 - C_1)\tilde{u}\rho_0 H_c / l, \quad (5)$$

где  $C_0$  – концентрация кислорода на входе в зону горения, %;  $C_1$  – концентрация кислорода на выходе из зоны горения, %;  $H_c$  – теплота сгорания твёрдого материала, кДж/кг.

Подставляя выражение (5) в формулу (4), будем иметь

$$T_1 = T_0 + \frac{0,01(C_0 - C_1)\tilde{u}H_c}{c(\tilde{u} + \bar{\alpha})}. \quad (6)$$

Используя эмпирическую зависимость температуры от скорости воздуха при горении дерева и почти полном расходовании кислорода до 1 % [3] можно определить исходные параметры, входящие в формулу (6). В этом случае при удельной теплоёмкости воздуха  $c = 1,04$  кДж/(кг·К) [2] получим теплоту сгорания  $H_c = 6250$  кДж/кг и удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки  $\bar{\alpha} = 0,25$ . Тогда, определяя концентрацию израсходованного кислорода на горение по формуле

$$C_0 - C_1 = CO_2 + 0,5CO, \quad (7)$$

получим следующую зависимость

$$T = T_0 + \frac{62,5(\text{CO}_2 + 0,5\text{CO})\tilde{u}}{\tilde{u} + 0,25}, \quad (8)$$

где CO – концентрация оксида углерода, %; CO<sub>2</sub> – концентрация диоксида углерода, %.

Это даёт возможность, получив информацию о концентрациях оксидов углерода, по формуле (8) определить температуру в очаге пожара.

Для установления достоверности полученной зависимости (8) в штольне НИИГД длиной 187 м и площадью поперечного сечения 4 м<sup>2</sup> проведено 8 экспериментов по исследованию состава пожарных газов и их влияния на температуру в зоне горения деревянной крепи.

Вентиляторная установка нагнетала свежий воздух и с помощью шиберного устройства позволила изменять скорость воздуха в широком диапазоне от 0,6 до 5 м/с.

Пожар инициировался поджиганием костра, сложенного из затяжек на входе в закрепленный участок. Костёр предварительно обливался керосином или трансформаторным маслом или поджигался без добавления горючих жидкостей. Было установлено, что способ поджигания крепи почти не оказывает влияния на скорость развития пожара.

Пламя быстро охватывало деревянные затяжки и распространялось как по струе воздуха, так и немного навстречу ей в основном под кровлей участка. В результате проведенных экспериментов получены табличные данные пожарных газов и температуры по её длине и в различное время от начала опыта продолжительностью до 2-х и 3-х часов наблюдений в зависимости от длины пожарной нагрузки.

Измерение температуры по высоте выработки в трёх точках показало, что она почти равномерно распределена, что объясняется турбулентным характером движения газов. Естественно, температура не остаётся постоянной во время горения. Сначала она резко повышается, а затем выходит на определённый уровень, зависящий от скорости воздуха.

Эксперименты показали, что коэффициент избытка воздуха близок к единице, так как концентрация кислорода опускалась до 1 % и ниже. Это объясняется тем, что основная масса кислорода вступает в реакцию в зоне горения и чем длиннее зона, тем на выходе меньше кислород и выше температура.

При возникновении и развитии пожара состав воздуха резко меняется. Появляются такие газы, как оксид и диоксид углерода, метан, водород и др. Экспериментальные исследования показали, что указанные газы появлялись в большом количестве, что приводило к резкому снижению концентрации кислорода.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные динамики концентраций кислорода и диоксидов углерода при скорости движения воздуха 0,6 м/с.

Как видно (рис. 1), при возникновении и развитии пожара концентрация кислорода резко уменьшается. В то же время быстро появляются в воздухе концентрации оксида и диоксида углерода и устанавливаются почти на тех же уровнях.

Как установлено, пожар приводит к резкому снижению кислорода до менее 2 % , к появлению в потоке воздуха CO концентрации от 4 % до 8 % и CO<sub>2</sub> концентрации от 16 % до 18 %. Отсюда видно, что несмотря на разные скорости движения воздуха концентрации оксидов углерода и кислорода находятся в довольно узких пределах.

В таблице приведены результаты экспериментов и расчётов по формуле (8) прогноза температуры по данным оксидов углерода.

Таблиця 1 — Результати сравнения расчётных и экспериментальных данных температуры по составу пожарных газов

Номер эксперимента	Скорость воздуха, м/с	CO <sub>2</sub> +0,5CO, %	T <sub>э</sub> , °C по экспериментальным данным	T <sub>р</sub> , °C по расчётным данным
1	1,0	19	1000	970
2	0,6	20,0	950	902
3	1,75	20,5	1100	1140
4	1,0	20,2	885	1030
5	1,0	19,5	930	995
6	1,0	20,8	1015	1060
7	2,1	21,5	1200	1220
8	3,1	21,2	1250	1246

Как видно, расчёты по формуле (8) достаточно точно согласуются с данными экспериментов. Поэтому формула (8) может быть использована для прогноза температуры по данным мониторинга.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные динамики температуры на разных расстояниях от места возникновения пожара при скорости движения воздуха 0,6 м/с.

Здесь также жирной линией приведены расчётные данные, температуры в зависимости от оксидов углерода в исходящей из пожарного участка струе воздуха, полученные при расчёте по формуле (8)

Как видно (рис. 2), прогноз температуры по формуле (8) и данным мониторинга достоверно отображает развитие пожара и даже его угасание, независимо от места расположения зоны горения.

Поступающие данные от датчиков пожарных газов и расхода воздуха на данный момент времени позволяют определить не только температуру в зоне горения, но и местонахождение  $x_1$  (м) переднего фронта пламени по формуле

$$x_1 = \frac{100Q_1\sqrt{S}}{1,2Q_1 + 1,5S} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0}, \quad (9)$$

где  $Q_1$  – расход воздуха на исходящей вентиляционной струе из пожарной выработки по данным мониторинга, м<sup>3</sup>/с,  $T_2$  – температура на исходящей вентиляционной струе, К.

Используя данные мониторинга можно найти также текущую длину  $l$  (м) зоны горения на любой момент времени  $\tau$

$$l = \frac{24(C_0 / C_1 - 1)Q_1}{\sum_i \Pi_i q_i (1 + 0,5Q_1 / S)}, \quad (10)$$

где  $\Pi_i$  – периметр горячей поверхности  $i$ -го материала, м;  $q_i$  - объём воздуха, необходимый для сгорания  $i$ -го горючего материала, м<sup>3</sup>/кг.

Количество горючего материала должно быть заранее известно для данной пожарной выработки.

При отсутствии данных о концентрации кислорода  $C_1$  на исходящей вентиляционной струе принимается  $C_1 = C_0 - CO_2 - 0,5CO$ . Если концентрация кислорода  $C_1 < 1\%$ , то длина зоны горения становится максимальной.

На рис. 3 представлена зависимость максимальной длины зоны горения от скорости движения воздуха ( $u = Q/S$ ).

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных показывают (рис. 3), что наблюдается удовлетворительная их сходимость в диапазоне скоростей 0,6 – 3 м/с при экспериментах, когда принято  $S = 4 \text{ м}^2$ ,  $\Pi_1 = 6 \text{ м}$ ,  $q_1 = 4 \text{ м}^3/\text{кг}$  для деревянной крепи [3].

Как видно, предложенная аналитическая зависимость (10) правильно отражает физику процесса. Так, при отсутствии вентиляции длина зоны горения должна быть равной нулю и не стремиться к бесконечности при увеличении скорости воздуха.

Выводы. Таким образом, установленные на исходящей вентиляционной струе датчики пожарных газов и кислорода, а также датчик скорости воздуха позволяют получить на основании разработанной и проверенной в экспериментальных условиях методики расчёта полную информацию о пожаре.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашковский П.С. Математическое моделирование динамики температуры при пожаре в шахтной вентиляционной сети / П.С. Пашковский, В.З. Брюм, А.В. Ревякин // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 12 – 17.
2. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздел. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
3. Осипов С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

