

УДК 622.822:622.411.3

В.З. Брюм, директор Петровского завода угольного машиностроения, Донецк

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО ПОЖАРА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

V.Z. Bryum, director (Petrovsky coal machine building plant, Donetsk)

METHODS OF CALCULATION OF PARAMETERS OF AN UNDERGROUND FIRE ACCORDING TO MONITORING DATA

Цель. Исследовать динамику подземных пожаров по данным мониторинга и предоставить полную информацию о пожарах.

Методика. Проведен анализ глобальной или структурной устойчивости вентиляционных струй при пожарах в наклонных или горизонтальных выработках.

Результаты. Определены условия образования встречных потоков газов при турбулентном и ламинарном режимах течения. Предложена методика расчёта параметров подземного пожара по данным датчиков непрерывного контроля исходящей из горной выработки вентиляционной струи, а именно данным о концентрациях диоксида углерода, скорости и температуре.

Научная новизна. Моделированием на ЭВМ показано, что предложенная методика расчёта по аналитическим зависимостям позволяет получать полную информацию о пожаре: вид горючего материала, температуру в зоне горения, длину зоны горения, местонахождение переднего фронта пламени, скорость перемещения пожара. Определено влияние основных параметров на устойчивость вентиляционных струй и появление встречных потоков пожарных газов. Приведены примеры расчёта нарушения проветривания в конвейерном уклоне при пожаре, когда расход воздуха уменьшается и возникают встречные потоки пожарных газов на расстоянии более 100 м, что приводит к проникновению оксида углерода на свежие струи воздуха. Поэтому датчик оксида углерода должен устанавливаться не только на исходящей, но и на поступающей струе воздуха в пожарной выработке.

Практическая значимость. Сравнение результатов расчёта параметров пожара показало их удовлетворительное согласование с экспериментальными данными, что позволяет рекомендовать созданную методику для использования при разработке планов ликвидации аварий и для своевременного обнаружения пожаров, их эффективного тушения.

Ключевые слова: пожар, выработка, конвейерный уклон, датчики контроля, оксиды углерода, скорость, температура, устойчивость струй, встречные потоки.

Постановка проблемы. Подземный пожар характеризуют следующие параметры: вид горящей пожарной нагрузки, место возникновения пожара, скорость перемещения очага пожара, длина зоны горения и тления, температура и состав пожарных газов в очаге и со стороны поступающей и исходящей из него вентиляционных струй с учётом их опрокидывания; степень нагревания горных пород. В зависимости от этих параметров формируется глобальная и локальная тепловые депрессии, а также возникает эффект термического расширения газов и дополнительного аэродинамического «теплого сопротивления». Получать эту информацию можно только по данным мониторинга и расчёта на ЭВМ параметров подземного пожара.

Анализ последних публикаций показал, что датчики аэрогазового и теплового контроля являются основными элементами автоматических систем

пожарной сигнализации. По функциональному назначению и отношению к потоку информации в системе сигнализации они представляют собой технические средства для получения информации о состояниях контролируемого объекта.

Цель работы – создание методики расчёта, позволяющей по данным мониторинга получать полную информацию о подземном пожаре.

Изложение основного материала. Основными датчиками контроля являются: датчики оксида и диоксида углерода, температуры и скорости воздуха. Выбор и правильная расстановка датчиков контроля дают возможность получать полную и достоверную информацию о подземном пожаре.

Пример расстановки датчиков контроля в уклонах представлен на рис. 1 с указанием места расположения очага пожара.

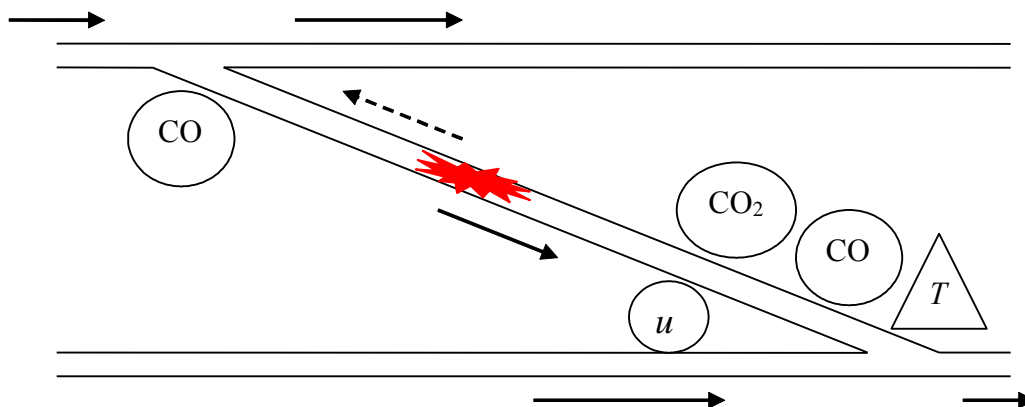


Рис. 1. Схема расстановки датчиков контроля в конвейерном уклоне

Методика разработана на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований и включает в себя расчёт устойчивости вентиляционной струи при пожаре в наклонной выработке и расчёт параметров встречного потока газов перед очагом пожара.

Расчёт устойчивости вентиляционной струи при пожаре в наклонной выработке

Исходными параметрами для расчёта служат:

Z_0 – начальная фоновая объемная доля оксида углерода до пожара, %;

Z_1 – максимальная объемная доля оксида углерода при развившемся пожаре, %;

CO – объемная доля оксида углерода по данным непрерывного контроля, %;

CO_2 – объемная доля диоксида углерода по данным непрерывного контроля, %;

C_1 – объемная доля кислорода по данным непрерывного контроля, %;

C_0 – объемная доля кислорода при нормальных условиях, %;

L – длина пожарной выработки, м;

H – высота выработки, м;

- S – средняя площадь поперечного сечения выработки, м^2 ;
 β – угол наклона выработки к горизонту, \dots° ;
 Q_0 – расход воздуха, проходящего по выработке, $\text{м}^3/\text{с}$;
 h_k – критическая депрессия, прикладываемая к выработке, Па;
 T_0 – температура при нормальных условиях, $^\circ\text{C}$;
 T_2 – температура на выходе из выработки, $^\circ\text{C}$;
 τ – время с момента воспламенения, мин;
 m_i – удельная масса i -го горючего материала, $\text{кг}/\text{м}^2$;
 q_i – объём воздуха, необходимый для сгорания i -го горючего материала, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 Π_i – ширина горячей поверхности i -го материала, м.
- Порядок расчёта
- Устанавливаем вид горячей пожарной нагрузки по данным датчиков контроля, используя табл. 1 и формулу

$$K = \frac{\text{CO}_2 + \text{CO}}{C_0 - C_1}. \quad (1)$$

В табл. 1 приведена приближённая оценка вида сгорающего вещества по предлагаемой формуле (1).

Таблица 1

Оценка вида сгорающего вещества

Сгорающее вещество	Метан	Уголь, метан, конвейерная лента	Уголь, древесина
K	0,5	0,5...1,0	1,0...2,0

- Определяем на момент времени τ текущую температуру, $^\circ\text{C}$, в зоне горения по формуле

$$T_1 = T_0 + \frac{62,5(\text{CO}_2 + 0,5\text{CO})Q}{Q + 0,25S}. \quad (2)$$

- Определяем ожидаемую предельную температуру, K , в зоне горения по формуле

$$T_{\text{II}} = T_0 + \frac{62,5(C_0 - 1)Q}{Q + 0,25S}. \quad (3)$$

- Определяем расстояние до переднего фронта пламени, м, по формуле

$$x_{\Pi} = \frac{100Q\sqrt{S}}{1,2Q + 1,5S} \ln \frac{T_{\Pi} - T_0}{T_2 - T_0}. \quad (4)$$

• Находим предельную скорость, м/мин, перемещения пожара, используя табл. 1 и 2:

$$v_{\Pi} = \frac{1200Q}{\sum_i m_i q_i \Pi_i (S + 0,8Q)}. \quad (5)$$

• Находим дальность распространения пожара L , м, с момента воспламенения:

$$L_{\Pi} = v_n \left\{ \tau - 15 \left[1 - \exp(-\tau/15) \right] \right\}. \quad (6)$$

• Определяем на момент времени τ текущую длину зоны горения, используя при этом табл. 1 и 2:

$$l = \frac{24(C_0/C_1 - 1)Q}{\sum_i \Pi_i q_i (1 + 0,5Q/S)}. \quad (7)$$

Таблица 2

Данные о горючих материалах

Вид материала	m_i , кг/м ²	Π_i , м	q_i , м ³ /кг	Примечание
Деревянная крепь	22 + 11р	$3\sqrt{S}$	4	р – количество рам на 1 м длины
Конвейерная лента	22 11	0,8...1,4	10	Резинотросовая Прочая
Уголь	5	0,8...1,4	8	На конвейере
Деревянные элементы	15	0,8...1,4	4	На конвейере
Силовой кабель	2	1	10	

• Определяем по формуле (7) предельную длину l_n , м, зоны горения при $C_1 = 1\%$.

- Находим показатель степени охлаждения пожарных газов за зоной горения, m^{-1} :

$$a = 0,01(1,2 + 1,5S/Q) / \sqrt{S}. \quad (8)$$

- Находим среднеинтегральный коэффициент расширения газов с учётом температуры по длине зоны горения и за нею:

$$k_c = 1 + (T_1/T_0 - 1) \frac{l}{L} + \frac{(T_1/T_0 - 1)}{aL} \left[1 - \exp(-ax_1) \right]. \quad (9)$$

- Определяем среднегармонический коэффициент расширения газов с учётом температуры по длине зоны горения и за нею:

$$k_r = 1 + (T_0/T_1 - 1) \frac{l}{L} + \frac{1}{aL} \left\{ \ln \left[1 + (T_1/T_0 - 1) \exp(-ax_1) \right] - \ln(T_1/T_0) \right\}. \quad (10)$$

- Определяем тепловую депрессию, Па, создаваемую пожаром:

$$h_T = (1 - 1/k_c) \rho_0 g L \sin \beta. \quad (11)$$

- Определяем аэродинамическое сопротивление, $Pa \cdot c^2/m^6$, выработки:

$$R = 0,1 \sqrt{SL} / S^3. \quad (12)$$

- Определяем коэффициент напорной характеристики условного вентилятора, проветривающего пожарную выработку:

$$b = h_k / Q_0 - RQ_0. \quad (13)$$

- Находим ожидаемый расход воздуха при действии тепловой депрессии:

$$Q_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4kR(h_k - h_T)}}{2kR}. \quad (14)$$

Если $h_T > h_k$, то произойдёт опрокидывание вентиляционной струи.

Пример. Определить устойчивость вентиляционной струи при пожаре в передаточном уклоне угольной шахты при следующих исходных данных:

$CO = 4 \%$; $CO_2 = 16 \%$; $C_0 = 21 \%$; $C_1 = 1 \%$; $L = 550$ м; $S = 8$ м²; $\beta = -10^\circ$; $Q_0 = 8$ м³/с; $h_k = 450$ Па.

Решение

- Устанавливаем вид горячей пожарной нагрузки по данным датчиков контроля, используя табл. 1 и формулу (1), и находим $K = 1$. По данным табл. 1, горит конвейерная лента и уголь на ней.

- Определяем на момент времени $\tau = 30$ мин текущую температуру, K , в зоне горения по формуле (2): $T_1 = 930$ °С.

- Определяем ожидаемую предельную температуру, K , в зоне горения по формуле (3): $T_n = 1030$ °С.

- Определяем расстояние до переднего фронта пламени, м, по формуле (4): $x_n = 410$ м.

- Находим предельную скорость, м/мин, перемещения пожара, используя табл. 1 и 2 и формулу (5): $v_n = 2,1$ м/мин.

- Находим дальность распространения пожара L , м, с момента $\tau = 30$ мин воспламенения по формуле (6): $L_n = 44$ м.

- Определяем на момент времени $\tau = 30$ мин текущую длину зоны горения, используя при этом табл. 1 и 2 и формулу (7): $l = 38$ м. Так как дальность распространения пожара превысила зону горения, то образовалась зона тления длиной $L - l = 6$ м.

- Определяем по формуле (7) предельную длину l_n , м, зоны горения при $C_1 = 1 \%$. Так как предельная длина зоны горения совпала с текущей, то $l_n = l = 38$ м.

- Находим показатель степени охлаждения пожарных газов за зоной горения по формуле (8): $a = 0,01$ м⁻¹.

- Находим среднеинтегральный коэффициент расширения газов с учётом температуры по длине зоны горения и за нею по формуле (9): $k_c = 1,27$.

- Определяем среднегармонический коэффициент расширения газов с учётом температуры по длине зоны горения и за нею по формуле (10): $k_T = 0,65$.

- Определяем тепловую депрессию, создаваемую пожаром по формуле (11): $h_T = -358$ Па.

- Определяем аэродинамическое сопротивление выработки по формуле (12): $R = 0,28$ Па·с²/м⁶.

- Находим коэффициент напорной характеристики условного вентилятора, проветривающего пожарную выработку по формуле (13): $b = 60$ Па·с/м³.

- Находим ожидаемый расход воздуха при действии тепловой депрессии по формуле (14): $Q_1 = 1,68$ м³/с.

Так как, по данным расчёта, тепловая депрессия меньше критической депрессии ($h_T < h_k$), то опрокидывания вентиляционной струи не происходит, но расход воздуха сокращается, что будет способствовать образованию встречного потока газов.

Расчёт параметров встречного потока газов перед очагом пожара

Встречные потоки газов при пожарах могут возникнуть в наклонных и в горизонтальных выработках.

Порядок расчёта

- Определяем средний коэффициент термического расширения газов перед зоной горения по формуле

$$k = (T_{\Pi} / T_0 + 1) / 2. \quad (15)$$

- Определяем показатель, m^{-1} , степени охлаждения пожарных газов перед зоной горения по формуле

$$a_1 = -0,1(Q_1 / S + \sqrt{(Q_1 / S)^2 + 0,08}). \quad (16)$$

- Находим параметр, определяющий подъёмную силу нагретых газов на входе в выработку:

$$G = 98H^2 \exp[a_1(L - x_1 - l_n)] / k. \quad (17)$$

- Определяем показатель степени изменения скорости по высоте выработки:

$$n = 4\sqrt{HQ_1 / S}. \quad (18)$$

- Определяем подкоренное выражение для расчёта профиля скорости:

$$B(\bar{y}) = -(Q_1 / S)^2 - a_1 G \bar{y}. \quad (19)$$

- Находим профиль скорости, м/с, чисто турбулентного потока для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$:

$$u_T(\bar{y}) = |B(\bar{y})| \operatorname{sign}[B(\bar{y})]. \quad (20)$$

- Находим профиль скорости, м/с, ламинарного и турбулентного потока для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$:

$$u(\bar{y}) = u_T(\bar{y}) + u_T[\operatorname{sign}(\bar{y})] \left(\frac{\exp(n\bar{y}) - \exp(-n\bar{y})}{\exp(n) - \exp(-n)} \right). \quad (21)$$

- Находим профиль объемной доли, %, пожарного газа (оксида углерода) для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$:

$$Z(\bar{y}) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp \left[-0,1 \left\{ u(\bar{y}) + \sqrt{u(\bar{y}) + 0,08} \right\} \right]. \quad (22)$$

Расчёт по формулам (21) и (22) позволяет определить на входе в выработку, а следовательно на сопряжении её со свежими струями, максимальные значения скорости и объемной доли пожарного газа (оксида углерода).

Пример 2. Установить возможность проникновения пожарных газов, особенно оксида углерода, на свежие струи при встречном их движении, используя те же исходные данные и данные примера 1, а также $Z_0 = 0 \%$ и $Z_1 = 4 \%$.

- Определяем средний коэффициент термического расширения газов перед зоной горения по формуле (15): $k = 2,65$.

- Определяем показатель степени охлаждения пожарных газов перед зоной горения по формуле (16): $a_1 = -0,056$ 1/м.

- Находим по формуле (17) параметр, определяющий подъёмную силу нагретых газов на входе в выработку: $G = -0,89$ м³/с².

- Определяем по формуле (18) показатель степени изменения скорости по высоте выработки: $n = 4,5$.

- Определяем по формулам (19) и (20) подкоренное выражение $B(\bar{y})$ для расчёта профиля скорости и сам профиль скорости чисто турбулентного потока $u_T(\bar{y})$ для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$ с шагом 0,1, которые не приводятся.

- Определяем изменение скорости, м/с, ламинарного и турбулентного потока для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$ с шагом 0,1 и представляем его в графическом виде на рис. 2.

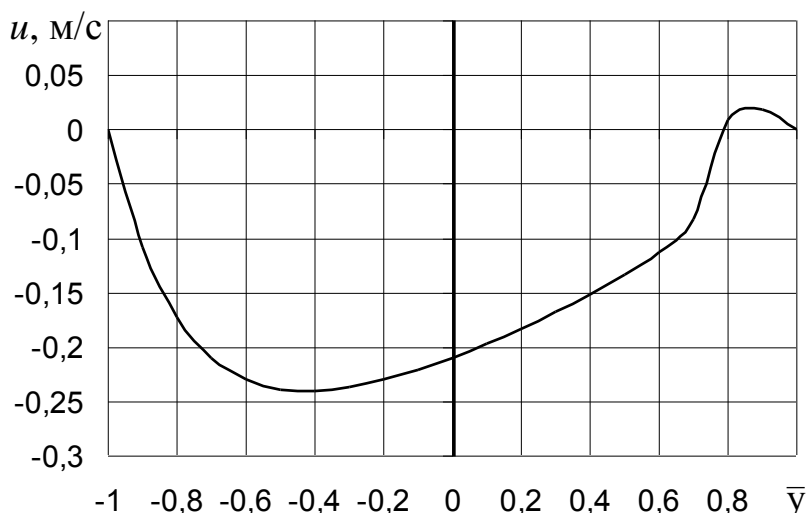


Рис.2. Изменение скорости потока газов на входе в пожарную выработку на расстоянии 102 м от зоны горения

- Определяем изменение объемной доли оксида углерода для значений $-1 \leq \bar{y} \leq 1$ с шагом 0,1 и представляем его в графическом виде на рис. 3.

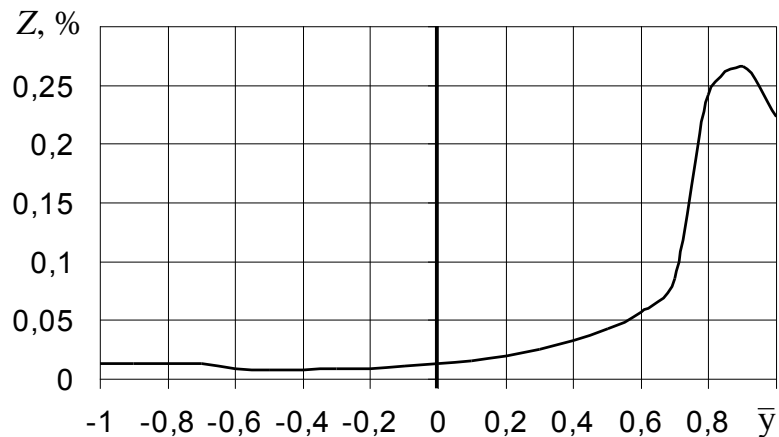


Рис. 3. Изменение объемной доли оксида углерода на входе в пожарную выработку на расстоянии 102 м от зоны горения

Расчёты произведены на ЭВМ в Excel в соответствии с разработанной программой.

Как установлено, расстояние до зоны горения от входа в пожарную выработку равно $x_0 = L - L_{\text{п}} - l = 550 - 410 - 38 = 102$ м.

Даже на расстоянии 102 м от зоны горения наблюдается опрокидывание потока воздуха под кровлей выработки толщиной 0,3 м (см. рис. 2). Это приводит к распространению оксида углерода до сопряжения выработки со свежими струями, где толщина слоя пожарного газа достигает 0,5 м с недопустимой объемной долей от 0,1 до 0,27 %.

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, на основании проведенных исследований разработана методика расчёта на ЭВМ параметров подземного пожара по данным датчиков контроля оксидов углерода, скорости и температуры в исходящей из пожарного участка струе воздуха. Методика позволяет устанавливать устойчивость вентиляционных струй в горизонтальных и наклонных пожарных выработках и делать прогноз возможности проникновения пожарных газов (оксида углерода) на свежие струи. Направление дальнейшей работы – внедрение полученных новых результатов в подсистему «Моделирование аварийных ситуаций – ПЛА» [1, 2].

Список литературы / References

1. Брюм В.З. Особенности функционирования подсистемы «Моделирование аварийных ситуаций – ПЛА» / В.З. Брюм, Н.М. Кравченко, М.В. Кравченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. // НИИГД «Респиратор». – 2008. – Вып. 45. – С. 110 – 116.

Bryum, V.Z., Kravchenko, N.M. and Kravchenko, M.V. (2008), *Osobennosti funktsionirovaniia podsystemy "Modelirovanie avariinykh situatsii – PLA"*

[Peculiarities of the functioning of the subsystem “Modeling the emergency situations – Plan of accident elimination”], NIIGD “Respirator”, Donetsk, Ukraine.

2. Пашковский П.С. Компьютерное моделирование распространения пожарных газов по шахтной вентиляционной сети / П.С. Пашковский, В.З. Брюм // Уголь Украины. – 2008. – № 6. – С. 28 – 30.

Pashkovsky, P.S. and Bryum, V.Z. (2008), *Kompiuternoe modelirovanie rasprostraneniia pozharnykh gazov po shakhtnoi ventilatsionnoi seti* [The computer modeling of spread of fire gases along the mine ventilation network], *Ugol Ukrainy*, no. 6, pp. 28 – 30.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.
Дата поступления рукописи 31.01.2014

Ціль. Дослідити динаміку підземних пожеж за даними моніторингу і надати повну інформацію про пожежі.

Методика. Проведений аналіз глобальної або структурної стійкості вентиляційних струменів при пожежах в похилих або горизонтальних виробках.

Результати. Визначені умови утворення зустрічних потоків газів під час турбулентного і ламінарного режимів течії. Запропонована методика розрахунку параметрів підземної пожежі за даними датчиків безперервного контролю вентиляційного струменю, який витікає з гірничої виробки, а саме даним про концентрації діоксидів вуглецю, швидкість і температуру.

Наукова новизна. Моделюванням на ЕОМ показано, що запропонована методика розрахунку на підставі аналітичних залежностей дозволяє отримувати повну інформацію про пожежу: вид горючого матеріалу, температуру в зоні горіння, довжину зони горіння, місцезнаходження переднього фронту полум'я, швидкість переміщення пожежі. Визначений вплив основних параметрів на стійкість вентиляційних струменів і появу зустрічних потоків пожежних газів. Наведені приклади розрахунку порушення провітрювання в конвеєрному похилі при пожежі, коли витрата повітря зменшується і виникають зустрічні потоки пожежних газів на відстані більше 100 м, що призводить до проникнення оксиду вуглецю на свіжі струмені повітря. Тому датчик оксиду вуглецю повинен встановлюватися не лише на струмені повітря, який витікає, але і на струмені, що поступає в пожежну виробку.

Практична значущість. Порівняння результатів розрахунку параметрів пожежі показало їх задовільне узгодження з експериментальними даними, що дозволяє рекомендувати розроблену методику для використання при розробці планів ліквідації аварій і для своєчасного виявлення пожеж, їх ефективного гасіння.

Ключові слова: пожежа, виробка, конвеєрний похил, датчики контролю, оксиди вуглецю, швидкість, температура, стійкість струменів, зустрічні потоки.

Purpose. To investigate the dynamics of the underground fires according to the monitoring data and to give the complete information about the fires.

Methodology. The analysis of the global or structural stability of the ventilation streams by the fires in inclined or lateral mine workings has been carried out.

Results. The conditions of formation of the counter gas flows by the turbulent and laminar flow regimes have been determined. The methods of calculation of the parameters of the underground fire according to the data of continuous control sensors of the ventilation stream coming from the mine working, namely according to the data about carbon dioxide concentrations, rate and temperature, are proposed.

Scientific novelty. It is shown by the computer-aided modeling that the methods of calculation on the analytical dependences proposed allow receiving the complete information about the fire: kind of a combustible material, temperature in the burning zone, length of the burning zone, location of the first flame front, fire movement rate. The influence of the basic parameters on stability of the ventilation streams and formation of the counter flows of the fire gases is determined. The examples of the calculation of the ventilation disturbances in the conveyor slope by the fire are adduced when the air consumption decreases and the counter flows of the fire gases arise at a distance of more than 100 m, what results in the penetration of carbon oxide to the fresh air streams. That's why the carbon oxide sensor should be installed not only at the outgoing air stream, but also at the air stream coming in the fire mine working.

Practical value. The comparison of the results of calculation of the fire parameters has shown their satisfactory concordance with the experimental data, what permits to recommend the methods created for the application by the working-out of the plans of accident elimination and for the well-timed detection of the fires and their effective fighting.

Keywords: fire, mine working, conveyor slope, control sensors, carbon oxides, rate, temperature, stability of the streams, counter flows.