

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ГАЗОВ НА СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Исследовано влияние расширения газов при их нагревании на интенсивность развития пожаров в горных выработках. Установлено, что при сравнении полученных аналитических решений развития пожаров с учётом и без учёта расширения газов, интенсивность нарастания температуры в зоне горения намного больше в первом случае. Показано, как по данным датчиков пожарных газов определяется концентрация кислорода на выходе из зоны горения, по которой устанавливается температура и скорость развития пожара. Это даёт возможность усовершенствовать подсистему УТАС при выборе методов и средств тушения пожаров и при определении безопасных маршрутов выхода людей из шахт.

Ключевые слова: пожар, возникновение, развитие, расширение газов, температура, концентрация кислорода, прогноз, датчики контроля.

Специалистами НИИГД «Респиратор» и ГП «Петровский завод угольного машиностроения» завершена разработка и в настоящее время внедряется на угольных шахтах подсистема «Противопожарная защита», являющаяся составной частью «Унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами» (в дальнейшем – подсистема УТАС). Названная подсистема 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 [1].

Одной из основных задач данной подсистемы является оперативный контроль ранних признаков пожара и самовозгорания угля. В этих условиях необходимо эффективно и быстро решать важнейшие практические задачи: рассчитывать проветривание шахт в нормальных и аварийных условиях, моделировать чрезвычайные ситуации, в частности, динамику развития пожара и прогнозировать места распространения пожарных газов.

Однако анализ существующих моделей возникновения и развития пожаров [2 – 5], показывает, что они не учитывают изменения скорости в очаге горения, изменения плотности пожарных газов, что не может не сказаться на точности прогноза аварийной ситуации.

Общеизвестно, что газы при нагревании расширяются. Так, в зоне высоких температур до 1000 °С скорость воздуха повышается в несколько раз, а его плотность во столько же раз уменьшается. Поэтому более корректно пользоваться массовой скоростью воздуха и уравнениями переноса любой субстанции (массы и энергии), используя классические уравнения [6].

Для описания процессов развития и распространения пожаров в горных выработках используем уравнение сохранения энергии в виде [6]

$$c\rho \frac{dT}{d\tau} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + q, \quad (1)$$

где c – удельная теплоёмкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг·К); ρ – плотность газов, кг/м³; T – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – интенсивность источника тепла при горении, кВт/м³.

В левой части уравнения (1) присутствует полная производная температуры по времени, а в правой части – дивергенция (div), как сумма частных производных по координатам и градиент (grad), как производная по выбранной координате.

Записывая уравнение (1) по трём направлениям и при одной скорости вдоль выработки, получим

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (2)$$

где u – продольная скорость движения воздуха, м/с; x – координата, направленная вдоль выработки, м.

Направления осей координат выберем, как на рис. 1, где z – координата поперёк выработки.

Представим в конечных разностях производные по координатам в уравнении (2.2) и получим

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) = \frac{\Delta}{\Delta x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (3)$$

где $T_{ст}$ – температура на стенках канала, К

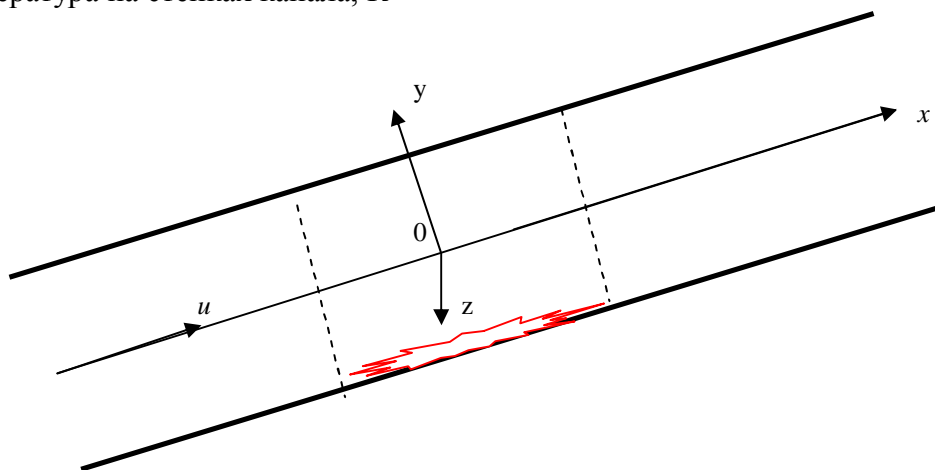


Рис. 1. Схема наклонной выработки с указанием зоны горения

Будем рассматривать процессы теплообмена в зоне горения на её длине $\Delta x = l$. Тогда, пренебрегая термодиффузией по сравнению с напорным переносом тепла и полагая на входе в зону горения температуру нормальной: $T = T_0$, будем иметь

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (4)$$

Примем шаги по высоте и ширине выработки равными: $\Delta y = h/2$, $\Delta z = b/2$, где h – высота выработки (м), b – ширина выработки (м).

В этом случае поток тепла к центру выработки будет равен нулю и принимает некоторое значение на стенках. Согласно [6] примем потоки на стенках равными

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T - T_c); \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_c), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплообмена смеси газов со стенками выработки, Вт/(м²К); T_c – температура стенки, К.

Подставляя равенства (5) в уравнение (4) и принимая $\Delta y = \Delta z$, $S = 4\Delta y \Delta z$, $\Pi = 8\Delta y$, представим уравнение (5) в виде

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha \Pi}{S} (T_c - T) + q, \quad (6)$$

где S – площадь сечения выработки, м²; Π – периметр выработки, м.
К уравнению (6) добавим уравнение состояния смеси газов [6]

$$P = \rho R T, \quad (7)$$

где P – давление, Па; R – газовая постоянная, Па·м³/(кг·К).

При дозвуковых потоках газов давление меняется незначительно, на несколько десятков или сотен Паскаль, что по отношению к атмосферному давлению, составляющему $P_0 = 10^5$ Па, ничтожно мало. Поэтому можно принять $P \approx P_0$, где P_0 давление при нормальных условиях. В этом случае, так как $R = P_0/(\rho_0 T_0)$, уравнение состояния газов (7) можно представить в виде

$$\rho / \rho_0 = T_0 / T. \quad (8)$$

Подставляя это выражение в уравнение (6), получим

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\rho u}{\rho_0} \frac{T - T_0}{l} = \frac{\alpha \Pi}{\rho_0 c S} (T_c - T) + \frac{q}{\rho_0 c}. \quad (9)$$

С ростом температуры плотность будет уменьшаться согласно (8), но тогда должна увеличиваться и скорость воздуха. Поэтому массовая скорость будет постоянной величиной

$$\tilde{u} = \rho u / \rho_0. \quad (10)$$

Деля левую и правую части уравнения (9) на T_0 и принимая, что стенки выработки не успевают прогреться ($T_c = T_0$), с учётом (10) получим

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = [(\tilde{u} / l + \bar{\alpha})(1 - \bar{T}) + \bar{q}] \bar{T}, \quad (11)$$

где $\bar{\alpha} = \frac{\alpha \Pi}{c \rho_0 S}$ – удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки, 1/с;

$\bar{q} = \frac{q}{c \rho_0 T_0}$ – удельная интенсивность тепловыделения в зоне горения, 1/с.

Полагая удельное тепловыделение в зоне горения постоянным на некотором промежутке времени, выделим стационарную часть из уравнения (11) и найдём предельную температуру в зоне горения.

$$\bar{T}_n = 1 + \frac{\bar{q} l}{\tilde{u} + \bar{\alpha} l}. \quad (12)$$

Можно получить аналитическое решение уравнения (11), если принять, что в начале горения температура была $T(0) = T_0$. Разделя переменные в уравнении (11) с источником тепла, представим его решение в виде

$$\frac{\bar{T} - \bar{T}_n}{\bar{T}(1 - \bar{T}_n)} = \exp(-\bar{T}_n \bar{\tau}), \quad (13)$$

где $\bar{\tau} = (\tilde{u} / l + \bar{\alpha}) \tau$ – безразмерное время.

Разрешим полученное решение (13) относительно искомой температуры и получим

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_n}{1 + (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{T}_n \bar{\tau})}. \quad (14)$$

Сравним полученное решение (14), с другим решением, если пренебречь расширением воздуха. В этом случае уравнение (11) примет вид

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = (\tilde{u} / l + \bar{\alpha})(1 - \bar{T}) + \bar{q}. \quad (15)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\bar{T} = \bar{T}_n - (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau}). \quad (16)$$

При остывании будет наблюдаться обратная картина: температура станет снижаться от T_n до T_0 . Тогда решения (14) и (15), учитывающие и не учитывающие расширение газов при остывании можно представить соответственно в виде

$$\bar{T} = \frac{T_n}{\bar{T}_n - (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau})}; \quad \bar{T} = 1 + (\bar{T}_n - 1) \exp(-\bar{\tau}). \quad (17)$$

На рис. 2 представлены результаты расчёта нагревания и остывания очага пожара по формулам (14), (16) и (17) при времени горения $\bar{\tau} = \bar{\tau}_1 = 3$ и при максимальной температуре $\bar{T}_n = 4$. Здесь же (рис. 2) приведена кривая (прерывистая линия), если учитывать расширение газов постоянным коэффициентом, как множителем перед параметром времени, равным

$$k = \frac{1 + \bar{T}_n}{2}. \quad (18)$$

Как показывают результаты расчёта (рис. 2), если время представить в часах, то без учёта расширения газов увеличение в три раза температуры в очаге пожара произойдёт через один час, а с учётом расширения – через полчаса. Ещё большие расхождения наблюдаются при дальнейшем развитии пожара, что нельзя не учитывать.

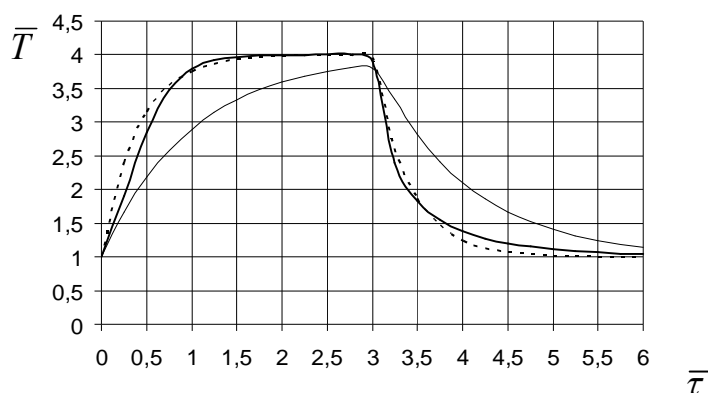


Рис. 2. Кривые нагревания и остывания очага пожара с учётом расширения (жирная линия) и без учёта расширения воздуха (тонкая линия)

Как видно (рис. 2), учёт термического расширения газов приводит к быстрому нагреванию и к быстрому остыванию очага пожара, если не учитывать нагретые стенки канала. Учёт нагревания стенок будет способствовать медленному остыванию потока воздуха и будет отражать термодинамические свойства окружающего массива.

Таким образом, с помощью коэффициента расширения газов можно с достаточной степенью точности описывать процессы нагревания и остывания очага пожара, что позволяет получить аналитические решения задачи при переменной во времени интенсивности горения [7], а также с учётом динамики концентрации кислорода в зоне горения.

Поэтому к уравнению переноса тепла добавим ещё уравнение переноса массы, в данном случае кислорода в одном направлении [6]

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - M, \quad (19)$$

где C – концентрация кислорода, %; D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии кислорода в направлении соответствующих координат, $\text{м}^2/\text{с}$; M – интенсивность источника расходования кислорода при горении, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$.

Пренебрегая диффузией кислорода в разных направлениях по сравнению с его переносом потоком воздуха, вместо уравнения (19) получим

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -M. \quad (20)$$

Поделим левую и правую части уравнения (20) на плотность при нормальных условиях ρ_0 и с учётом (8) будем иметь

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = -M / \rho_0. \quad (21)$$

Очевидно, что и в полученном уравнении (21) переноса массы необходимо учитывать расширение газов, как путём введения массовой скорости, так и множителя перед производной по времени, что в ряде работ не учитывается или вообще не рассматривается это уравнение в предположении, что кислорода для горения достаточно. Однако в нашем случае, когда как раз влияние кислорода на горение может существенно сказаться на определении состава пожарных газов, необходимо рассматривать и это уравнение (21).

Как и перед этим, выразим производную по длине выработки в конечных разностях и представим уравнение (21) в виде

$$\frac{dC}{d\tau} = [\tilde{u}(C_0 - C)/l - M / \rho_0] \frac{T}{T_0}. \quad (22)$$

Представим концентрацию кислорода в безразмерном виде: $\bar{C} = C / C_0$ и принимая $T/T_0 \approx k$, вместо (22) получим

$$\frac{d\bar{C}}{d\tau} = k[\tilde{u}(1 - \bar{C})/l - M / (\rho_0 C_0)]. \quad (23)$$

Предположим, что интенсивность поглощения кислорода в зоне горения зависит от его концентрации: $M = M_0 C$, где M_0 – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость выгорания топлива, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Подставляя этот коэффициент в уравнение (23), будем иметь

$$\frac{d\bar{C}}{d\tau} = k[\tilde{u}(1 - \bar{C})/l - M_0 \bar{C} / \rho_0]. \quad (24)$$

Полагая в качестве начального условия $C(0) = C_0$, можно получить аналитическое решение уравнения (24), выделив его стационарную часть

$$C_n = \frac{\tilde{u} C_0}{\tilde{u} + M_0 l / \rho_0}. \quad (25)$$

Из анализа полученной формулы (25) следует, что чем больше скорость воздуха, тем медленней уменьшается концентрация кислорода. В то же время увеличение интенсивности поглощения приводит к заметному снижению кислорода в зоне горения, особенно при её большой длине.

В этом случае решение уравнения (24) представим в виде

$$C(\tau) = C_1 + (1 - C_1) \exp[-k(\tilde{u}/l + M_0 / \rho_0)\tau]. \quad (26)$$

На рис.3 приведены кривые изменения во времени концентрации кислорода в зоне горения с учётом и без учёта термического расширения газов.

Здесь же приведена кривая расходования кислорода $(1 - \bar{C})$ в зоне горения с учётом термического расширения газов. Как видно, термическое расширение газа приводит к резкому изменению концентрации кислорода, что ранее не учитывалось. При расчётах принято: $\bar{\tau} = (\tilde{u}/l + M_0 / \rho_0)\tau$; $\bar{C}_n = 0,1$; $k = 2,5$.

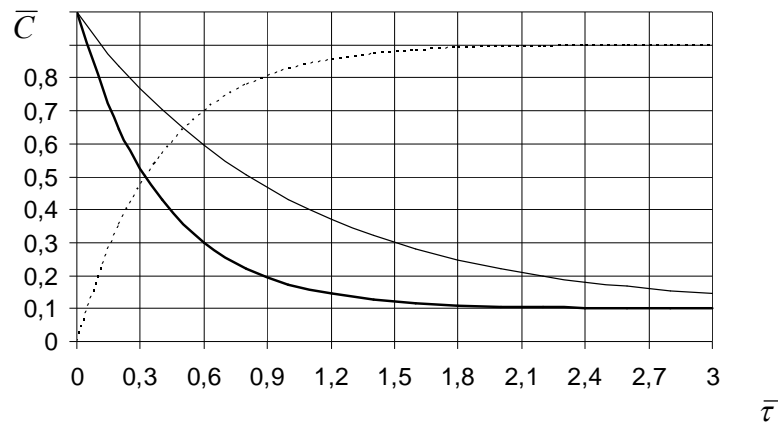


Рис. 3. Кривые изменения во времени концентрации кислорода в зоне горения без учёта (тонкая линия) и с учётом (толстая линия) термического расширения газов

Интенсивность источника тепловыделения при горении q обязательно должна быть связана с концентрацией кислорода. Об этом говорят многочисленные экспериментальные исследования [2]. Предложенный метод фактически выделяемого количества тепла основан на том, что если определена скорость расхода кислорода, то можно непосредственно определить и интенсивность тепловыделения. Этот метод был рекомендован как в стандартных тестах, так и при натурном моделировании пожаров [2]. Предложенная для расчёта интенсивности тепловыделения (кВт) формула имеет вид [2]

$$G = [(C_0 - C) / 100] Q \rho H_c, \quad (27)$$

где Q – расход воздуха, м³/с; H_c – теплота сгорания горючих веществ, кДж/кг.

Однако для расчёта интенсивности тепловыделения в единице объёма необходимо разделить (27) на длину зоны горения l и на площадь поперечного сечения выработки S . В результате получим (кВт/м³) формулу, удобную для дальнейших расчётов:

$$q = [(1 - \bar{C}) C_0 / 100] \tilde{\mu} \rho_0 H_c / l. \quad (28)$$

Выразим промежуточную температуру через исходные параметры, входящие в формулы (12) и (28):

$$\bar{T}_i = 1 + \frac{[(C_0 - C_i) / 100] \tilde{\mu} H_c}{c T_0 (\tilde{\mu} + 2 \tilde{\alpha} l / 3)}. \quad (29)$$

Здесь индексы $i = 1$ и $i = 2$ означают данные мониторинга при разном времени.

Полученные формулы (25) и (29) позволяют определить предельную как концентрацию кислорода, так и температуру в зоне горения, а расчёты по формулам (14) и (26) дают возможность проследить, как меняются во времени температура и концентрация кислорода.

Как уже отмечалось, подсистема УТАС «ПОЖАР» предназначена для непрерывного измерения параметров шахтной атмосферы и передачи информации на диспетчерский пункт, ее обработки и отображения. В этом случае от датчиков контроля пожарных газов поступают данные о концентрациях оксида СО и диоксида кислорода СО₂. Зная эти данные, можно определить, сколько израсходовано кислорода на горение

$$C_0 - C_i = C_{CO_2} + 0,5 C_{CO}, \quad (30)$$

где C_{CO_2} – концентрация диоксида кислорода, %; C_{CO} – концентрация оксида кислорода, %.

Так, например, используя эмпирическую зависимость температуры от скорости воздуха при горении дерева и почти полном расходе кислорода до 1 % [8] можно определить исходные параметры, входящие в формулу (29). В этом случае при удельной теплоёмкости воздуха $c = 1,04$ кДж/(кг·К) [2] получим теплоту сгорания $H_c = 6500$ кДж/кг и удельный коэффициент теплообмена со стенками выработки $2\bar{\alpha}l/3 = 0,25$. Далее, по данным мониторинга, согласно (30) определяем при разном времени расходу кислорода $\Delta C(\tau_1)$ и $\Delta C(\tau_2)$, а по ним температуры по формуле (29). Зная два значения времени можно по формуле (29) определить два значения температуры. Далее, задавшись предельной температурой и используя зависимость (16), устанавливаем скорость развития пожара с учётом термического расширения воздуха и время выхода на предельную температуру, когда возникают наиболее опасные встречные потоки пожарных газов.

После внесения новых результатов по развитию пожаров с помощью комплекса программ «Вентиляция шахт» можно непосредственно на шахтах более достоверно моделировать аварийные ситуации (пожары), рассчитывать аварийные вентиляционные режимы, маршруты движения отделений горноспасателей, разрабатывать мероприятия по спасению людей и эффективной ликвидации аварий.

Таким образом, разработанная математическая модель тепломассообменных процессов в горных выработках при пожарах позволяет достоверно производить математическое моделирование динамики температуры в зависимости от концентрации кислорода, связанной с концентрациями продуктов горения.

Выводы. Полученные аналитические решения развития подземного пожара показали необходимость учёта термического расширения газов. Разница в скорости развития пожара может в два и более раз отличаться от обычно используемых данных расчётов динамики пожара без учёта расширения газов. Основными показателями скорости развития пожара следует считать оксиды углерода с их пересчётом на концентрации кислорода и прогнозом по ним температуры очага горения, существенно зависящей от массового расхода воздуха.

Список литературы:

1. Пашковский П.С. Компьютерное моделирование распространения пожарных газов по шахтной вентиляционной сети / П.С.Пашковский, В.З. Брюм // Уголь Украины. – 2008. – № 2. – С. 28 – 30.
2. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздел. М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
3. Ковалишин В.В. Математичне моделювання розвитку і гасіння пожеж різними способами на об'єктах значної протяжності / В.В. Ковалишин // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 1 (27). – С. 153 – 160.
4. Греков С.П. Теплофизические процессы в горных выработках при экзогенных пожарах / С.П. Греков, С.Н. Смоланов, Н.С. Почтаренко, А.А. Березовский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД, 2000. – С. 39 – 46.
5. Ильин В.В. Моделирование пожаров в подземных транспортных сооружениях / В.В. Ильин, В.П. Беляцкий // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Пожнаука. – 2000. – С. 278 – 318.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.
7. 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», 2007. – Вып. 44. – С. 12 – 17.
8. Осипов С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО РОЗШИРЕННЯ ГАЗІВ НА ШВИДКІСТЬ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

Досліджено вплив розширення газів при їх нагріванні на інтенсивність розвитку пожеж у гірничих виробках. Встановлено, що при порівнянні отриманих аналітичних вирішень розвитку пожеж з урахуванням та без урахування розширення газів, інтенсивність наростання температури в зоні горіння набагато більше у першому випадку. Показано, як за даними датчиків пожежних газів визначається концентрація кисню на виході із зони горіння, за якою встановлюється температура і швидкість розвитку пожежі. Це дає можливість удосконалити підсистему УТАС при виборі методів і засобів гасіння пожеж і при визначенні безпечних маршрутів виходу людей з шахт.

Ключові слова: пожежа, виникнення, розвиток, розширення газів, температура, концентрація кисню, прогноз, датчики контролю.

W.Z. Bryum

INFLUENCE OF THE THERMAL EXPANSION OF GASES ON THE FIRE DEVELOPMENT VELOCITY IN COAL MINES

The influence of the expansion of the gases by their heating on the intensity of development of the fires in the mine workings is investigated. By comparison of the analytical solutions of development of the fires received it is ascertained that by taking into account and without taking into account the expansion of the gases the intensity of the temperature increase in the burning zone is much more in the first case. It is shown how the oxygen concentration at the outlet of the burning zone is determined by means of the data of sensors. The temperature and the fire development velocity are ascertained according to this oxygen concentration. It gives an opportunity to improve the subsystem by choice of methods and means of fighting the fires and by determination of the safe routes of escape of the people out of the mines.

Keywords: fire, origin, development, growth, expansion of gases, temperature, oxygen concentration, forecast, control sensors

