

Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.831.322:622.411.33

В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ОТТОРГНУТОГО ОТ МАССИВА УГЛЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ УГЛЯ И ГАЗА В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

НИИГД «Респиратор»

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования газовой выделения из частиц угля при выбросах в широком диапазоне времен. Предложены зависимости для описания процесса загазовывания выработок после выбросов угля и газа

Ключевые слова: выброс, метан, выделение газа, опасная по взрыву зона

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований.

Газовыделение из отторгнутого от массива угля в виде кусков представляет значительный интерес как для ученых, так и для практических работников шахт, поскольку нередко является причиной загазованности горных выработок. Многочисленные случаи взрывов метано-воздушных смесей в угольных шахтах свидетельствуют о необходимости рассмотрения взаимосвязанных вопросов газовой выделения из углей с образованием в шахтах зон со взрывными концентрациями метана. Такая задача была рассмотрена в совместной работе НИИГД и МакНИИ в 2006 г. [1]. При выполнении исследований полагали, что тупиковая выработка не проветривается и практически мгновенно заполняется выброшенным из угля метаном.

Как показано в [2–4], в реальных условиях шахт после внезапных выбросов метан из отторгнутого от массива угля выделяется длительное время в зависимости от крупности частиц угля и сопротивляемости его пор, отождествляемой авторами с коэффициентом диффузии. Это приводит к длительной загазованности выработок на значительном расстоянии от места выброса.

Сказанное выше приводит к мысли о необходимости дополнительных исследований загазованности тупиковых выработок после внезапных выбросов с учетом их проветривания и фракционного состава угля.

Цель работы – изучение газовой выделения из частиц отторгнутого от массива угля, нахождение параметров газоотдачи и расчет на этой основе зон загазованности горных выработок при внезапных выбросах угля и газа в тупиковых забоях.

Основная часть. При исследовании динамики газовыделения из угля после его отторжения от массива, особенно в случае внезапных выбросов, повышенный интерес представляет изучение процесса газовыделения в первоначальный период разрушения массива, составляющего до 80 % в зависимости от фракционного состава угля. Именно это количество десорбирующего метана определяет первоначальную зону загазованности. Последующее же выделение метана, которое длится часами и даже сутками, расширяет эту зону, которая в некоторых случаях может достичь таких размеров, что выходит за пределы выработок, где произошел выброс, иногда достигая поверхности (шахта Аграрн № 2, Бельгия, 1879 г.; шахта «Ключи 1–3» Ерошинского месторождения, 1959 г.; шахта имени Ю.А. Гагарина, 1969 г. и др.).

Математическая модель процесса диффузии метана из частиц угля была сформулирована в работе [5]. Аналитическое решение задачи получено в виде

$$q(t) = q_0 \left[1 - \frac{1}{\delta - \mu} \{ \delta \exp(-\mu t) - \mu \exp(-\delta t) \} \right], \quad (1)$$

где q_0 – общее количество выделившегося метана, м³; δ – коэффициент массоотдачи, связанный с молекулярной диффузией газа в порах, 1/с; μ – коэффициент десорбции метана из угля, 1/с.

В работе [6] показано, что коэффициент массоотдачи зависит от размеров частиц и определяется по формуле

$$\delta = 6D / R^2, \quad (2)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии газа, м²/с; R – радиус частиц угля, м.

Как установлено наблюдениями в натуральных условиях, уголь при выбросе измельчается до пыли, поэтому параметр δ будет намного превышать параметр μ , т. е. $\delta \gg \mu$. Это позволяет упростить формулу (1) и представить её в виде

$$q(t) = q_0 [1 - \exp(-\mu t)]. \quad (3)$$

Для определения параметра μ воспользуемся данными авторов [7], которые выполнили исследования газовыделения из отторгнутого от массива угля с помощью автоматических пробоотборников метано-воздушной смеси. Всего было отобрано 116 проб рудничного воздуха при 18 сотрясательных взрывах, сопровождавшихся выбросами угля и газа. Кривая изменения концентраций метана C (%) по всем пробам, отобранным авторами работы, представлена на рис. 1 сплошной линией, описываемой в [7] зависимостью

$$C(t) = 0,0472t + 0,035t^2 - 0,118, \quad (4)$$

где t – время от начала выброса, с.

При переводе содержания метана в пробах из размерности в процентах в единицы моль/м³ было принято, что выделившийся из угля метан соответствует величине газоносности пласта 2800 моль/м³.

Аппроксимируя экспериментальные данные [7] выражением (3), получим кривую 2 (рис. 1), построенную для параметра $\mu = 1,19 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

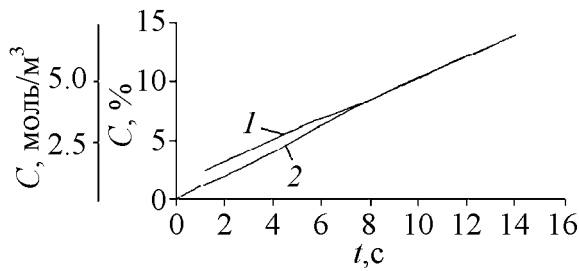


Рис. 1. Содержание метана в тупиковом забое: 1 – кривая построена по экспериментальным данным [7], 2 – теоретическая кривая, построенная по выражению (3)

Уравнение переноса метана, выделившегося после внезапного выброса в тупиковой выработке и образовавшего зону с взрывоопасной концентрацией, запишем в виде [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + i(x, t), \quad (5)$$

где $i(x, t)$ – функция интенсивности газовыделения из угля на длине от x_1 до x_2 зоны выброса, которая получена дифференцированием выражения (3) по t в виде

$$i(t) = \frac{\mu q_0}{S(x_2 - x_1)} \exp(-\mu t). \quad (6)$$

В качестве начального и граничных условий для уравнения (5) для тупиковой выработки можно принять:

$$\frac{\partial C(0, t)}{\partial x} = 0; C(\infty, t) = C_0; C(x, 0) = C_0, \quad (7)$$

где C_0 – концентрация метана в выработке до выброса, об. доли.

Представим уравнение (5) в конечных разностях:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} + \frac{\Delta(uC)}{\Delta x} = \frac{\Delta}{\Delta x} \left(D_x \frac{\Delta C}{\Delta x} \right) + i(x, t). \quad (8)$$

Применим численный метод решения уравнения (8) с разностями против потока метана [9]. При постоянных значениях параметров u и D_x получим

$$\frac{C_m^{n+1} - C_m^n}{\Delta t} + u \frac{C_m^n - C_{m-1}^n}{\Delta x} = \frac{C_{m-1}^n - 2C_m^n + C_{m+1}^n}{\Delta x^2} + i(x_m, t_n), \quad (9)$$

где Δx – шаг по длине выработки, м; Δt – шаг по времени, с.

Здесь индекс m относится к узлу сетки на координате x , а индекс n – к узлу сетки на координате времени.

Разрешая уравнение (9) относительно концентрации метана на новом временном слое, получаем

$$C_m^{n+1} = C_m^n + \frac{u\Delta t}{\Delta x} (C_{m-1}^n - C_m^n) + \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2} (C_{m-1}^n - 2C_m^n + C_{m+1}^n) + i(x_m, t_n) \Delta t. \quad (10)$$

Введём в рассмотрение критерии моделирования процесса переноса метана:

$$Cu = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \text{ – число Куранта и } Fo = \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} \text{ – диффузионное число Фурье [9].}$$

Тогда уравнение (10) примет критериальный вид

$$C_m^{n+1} = (Cu + Fo)C_{m-1}^n + (1 - Cu - 2Fo)C_m^n + FoC_{m+1}^n + i(x_m, t_n)\Delta t. \quad (11)$$

Функция источника газовыделения на длине $(x_2 - x_1)$ согласно (6) в конечных разностях примет вид

$$i(t_n)\Delta t = \frac{\mu\Delta tq_0}{S(x_2 - x_1)} \exp(-\mu\Delta tn), \quad (12)$$

где n – количество шагов по времени; S – площадь поперечного сечения выработки, m^2 .

В работе [6] на основании экспериментов по истечению метана из углей после 30 мин отделения их от массива установлено, что при радиусе частиц угля $r = 0,002$ м из него за время $t = 10^5$ с выделится 80% метана. В этом случае показатель степени у экспоненты в выражении (7) будет равен $\mu t = 1,6$. Поток метана с поверхности частиц угля в единице объёма составляет:

$$\mu = v \frac{4\pi R^2}{4\pi R^3 / 3} = 3v / R, \quad (13)$$

где v – скорость десорбции метана, м/с; R – приведенный радиус частиц угля, м.

Это даёт возможность, зная, что при радиусе частиц $R = 0,002$ м основной вынос метана (80%) длится $t = 10^5$ с, определить скорость десорбции v по формуле

$$v = 1,6 \frac{R}{3t} = 1,6 \frac{0,002}{3 \cdot 10^5} \approx 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Условием устойчивости расчётной схемы (11) является требование

$$Cu + 2Fo < 1.$$

В ряде работ [11, 12] коэффициент турбулентной диффузии связывают со скоростью движения воздуха. Так, примем согласно [11] коэффициент турбулентной диффузии равным

$$D_x = 4,43(ud)^{2/3}, \quad (14)$$

где d – приведенный диаметр выработки, м.

На рис. 2 представлены кривая зависимости (14) и линия тренда в виде линейной функции

$$D_x = 0,3 + 3ud. \quad (15)$$

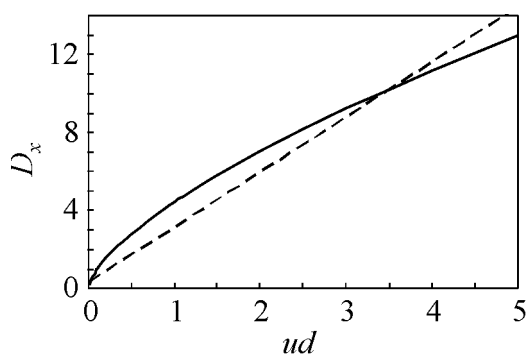


Рис. 2. Результаты сравнения степенной (сплошная линия) и линейной (штриховая линия) зависимостей коэффициента турбулентной диффузии от скорости воздуха

Достоверность такой аппроксимации составляет $B^2 = 0,95$. Поэтому более удобно пользоваться линейной зависимостью (15) еще и ввиду того, что коэффициент диффузии и при отсутствии скорости воздуха не обращается в нуль, так как существуют хаотические тепловые потоки и газовыделение.

При численном моделировании газодинамических процессов, задавая шаг по длине выработки Δx , можно из условий устойчивости счёта (13) и (15) определить и шаг по времени, приняв $d = \sqrt{S}$:

$$\Delta t = \frac{0,9\Delta x}{u + 2(0,3 + 3u\sqrt{S}) / \Delta x} . \quad (16)$$

В соответствии с предложенной расчётной схемой (10) с разностями против потока метана разработана программа моделирования формирования взрывоопасной среды при выбросах породы угля и газа в тупиковых выработках (рис. 3).

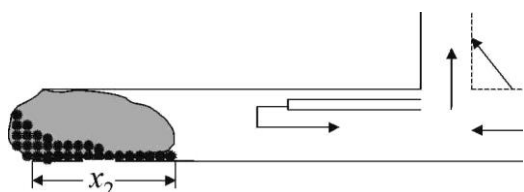


Рис. 3. Схема тупиковой проветриваемой выработки при внезапном выделении метана в забое

Допустим, что при выбросе в тупиковом забое проветривание выработки сохраняется и скорость потока составляет 0,5 м/с. Пусть в результате выброса угля в количестве $G = 100$ т из него выделится метан общим объёмом $q_0 = 2500$ м³. При такой интенсивности выброса угля дальность его отброса согласно [7] сравнительно невелика и составляет $(x_2 - x_1) = 8 - 12$ м. Тогда при площади сечения лавы $S = 11$ м² можно согласно (12) принять

$$\bar{q}_0 = \frac{q_0}{S(x_2 - x_1)} = \frac{2500}{11 \cdot 10} = 23 .$$

Задавая шаг по длине выработок $\Delta x = 10$ м, найдём согласно (16) шаг по времени

$$\Delta t = \frac{0,9 \cdot 10}{0,5 + 2 \cdot (0,3 + 3 \cdot 0,5 \sqrt{11}) / 10} \approx 6 .$$

Экспериментальные исследования на многих шахтах Донбасса [10] дали возможность установить энергоёмкость разрушения углей при внезапных выбросах угля и газа. При этом пробы угля из разрушенной массы отбирали по стандартной методике опробования сыпучих материалов. Разрушенный при выбросах уголь подвергали анализу с разделением на ситах частиц на 12-14 фракций. Характерным признаком внезапных выбросов является наличие в выработках «бешеной муки», которая представляет собой не что иное, как осевшую угольную пыль. Дисперсионный анализ проб «бешеной муки» показал, что она на одну треть состоит из частиц диаметром менее 0,00008 м, причём в такой угольной пыли присутствуют в некотором количестве и крупные частицы размером до 0,007 м.

Сравнение данных о степени разрушения угля при внезапных выбросах и просто при его механическом разрушении показало [10], что содержание пылевидных частиц угля в пробах в обоих случаях вполне сопоставимо. Тем самым опровергнуто укоренившееся мнение о том, что внезапные выбросы характеризуются образованием большого количества «бешеной муки». Общая практика диспергирования углей при внезапных выбросах указывает на довольно частые случаи практически отсутствия образования «бешеной муки». Кроме того, не подтверждено предположение о том, что с увеличением интенсивности выброса угля повышается степень его диспергирования.

Тщательный анализ данных приведенных средних радиусов частиц угля при внезапных выбросах [10] показал, что радиус находится в довольно узком диапазоне $R = 0,0001-0,0003$ м. При этом лишь в трёх случаях из 34 выбросов в лавах, штреках, квершлагах, уклонах этот радиус составлял 0,0004–0,0007 м.

Поэтому примем для данного примера $R = 0,0002$ м. Тогда параметр $\mu\Delta t$ будет равен

$$\mu\Delta t = \frac{3v}{R} \Delta t = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{0,0002} 7 = 0,0011.$$

В результате в данном примере при числах Куранта $Cu = 0,63$ и Фурье $Fo = 0,135$ с учётом вида функции газовыделения (12) уравнение (14) примет удобный для моделирования вид

$$C_m^{n+1} = 0,765C_{m-1}^n + 0,1C_m^n + 0,135C_{m+1}^n + 0,055 \exp(-0,0011n). \quad (17)$$

На рис. 4 приведены результаты моделирования формирования взрывоопасной среды в тупиковом забое и за его пределами после выброса.

Как показывают результаты моделирования, взрыв в тупиковом забое может произойти сразу же после выброса, если имеется источник воспламенения, либо взрыв возникнет уже за его пределами, и мгновенное горение распространится обратно в тупиковый забой. В этом случае взрыв будет огромной мощности, поскольку, как видно на рис. 4, длина зоны с концентрацией метана 10–12% составляет почти 900 м.

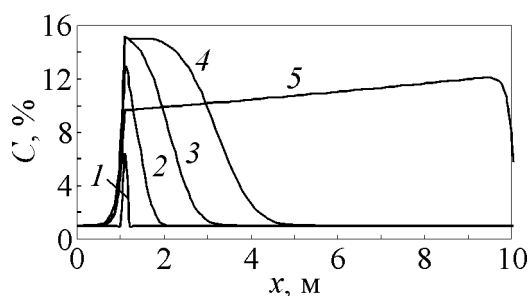


Рис. 4. Формирование концентраций метана в тупиковом забое и за его пределами в различное время после выброса: 1 – $t = 7$ с; 2 – 1,2 мин; 3 – 3,7 мин; 4 – 7,3 мин; 5 – 61 мин

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Получено численно-аналитическое решение задачи загазованности выработок до взрывоопасных концентраций при газодинамических явлениях в шахтах. В дальнейшем результаты исследований предполагается использовать для расчетов распространения зоны загазованности при возникновении воздушных ударных волн в горных выработках

1. Брюханов А.М. Закономерности формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах породы, угля и газа в тупиковых выработках угольных шахт / А. М. Брюханов // 36. наук. пр. «Пожежна безпека» / ЛДУ БЖД. – Львів, 2007. – № 10. – С. 121 – 125.
2. Микитченко В.Ф. Определение газовыделения из отторгнутого от массива угля / В.Ф. Микитченко // Уголь Украины. – 1964. – № 12. – С. 42 – 45.
3. Яновская М.Ф. О скорости десорбции метана из разрушенного угля / М.Ф. Яновская // Проблемы рудничной аэрологии: сб. науч. тр. – М.: Госгортехиздат, 1959. – С. 198 – 205.
4. Wicke E. Empirische und theoretische Untersuchungen der Sorptionsgeschwindigkeit von pulverösen Stoffen / E. Wicke // Kolloid Zeitschrift. – 1939 – 86. – S. 167.
5. Березовский Н.А. Математические модели процессов диффузии, сопровождающиеся адсорбцией и химическими реакциями / Н.А. Березовский // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения: сб. науч. тр. / Ин-т математики НАН Украины. – Киев, 1998. – С. 29 – 31.
6. Греков С.П. Истечение метана из частиц угля / С.П. Греков, Б.И. Кошовский, М.В. Илык и др. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респирактор». – Донецк, 2002. – С. 74 – 88.
7. Волошин Н.Е. Газовыделение при выбросах. К разработке малоинерционной аппаратуры противогазовой защиты / Н.Е. Волошин, А.Е. Ольховиченко, В.А. Воронин. – 2-е изд., испр. и доп. – Донецк: Изд-во «Кассиопея», 2008. – 51 с.
8. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 481 с.
9. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П.Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
10. Борисенко А.А. Диспергирование углей при внезапных выбросах / А.А. Борисенко // – М.: Наука, 1985. – 96 с.
11. Греков С.П. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях / С.П. Греков, А.Е. Калюсский. – М.: Недра, 1975. – 121 с.
12. Воронин В.М. Основы рудничной аэрогазодинамики / В.М. Воронин. – М.: Углетехиздат, 1951.

В.Г. Агеев, С.П. Греков, І.М. Зінченко

ГАЗОВИДІЛЕННЯ З ВІДТОРГНЕНОГО ВІД МАСИВУ ВУГІЛЛЯ
І ФОРМУВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН ПРИ РАПТОВИХ
ВИКИДАХ ВУГІЛЛЯ І ГАЗА В ТУПИКОВИХ ПІРНИЧИХ ВИРОБКАХ

Виконано теоретичні й експериментальні дослідження газовиділення з часток вугілля при викидах у широкому діапазоні часів. Запропоновано залежності для опису процесу загазування виробок після викидів вугілля й газу

Ключові слова: викид, метан, виділення газу, небезпечна по вибуху зона

V.G. Ageyev, S.P. Grekov, I.G. Zinchenko

GAS EMISSION OUT OF THE COAL MASSIF REJECTED
AND FORMATION OF EXPLOSION-HAZARDOUS ZONES
BY SUDDEN COAL AND GAS OUTBURSTS IN MINE BLIND DRIFTS

The theoretical and experimental investigations of gas emission out of the coal particles by the outbursts in the wide range of times have been fulfilled. The dependences to describe the process of gassing the mine workings after the coal and gas outbursts are proposed.

Keywords: the coal and gas outbursts, methane, gas emission, dangerous on an explosion area