

Канд. техн. наук А.М Брюханов  
(МАКНИИ)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ УГЛЯ И ГАЗА В ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Викладені результати досліджень щодо встановлення залежності концентрації метану під час викиду вугілля і газу і умов загазування виробок виймальної ділянки шахти.

## **MATHEMATICAL MODELLING OF LAWS OF FORMATION OF THE EXPLOSIVE ENVIRONMENT AT SUDDEN EMISSIONS OF COAL AND GAS IN CLEARING DEVELOPMENTS**

Results of researches on an establishment of dependence of concentration of methane are stated at emission of coal and gas and conditions загазування developments выемочного a site of mine.

В проблеме предупреждения и профилактики взрывов метана в угольных шахтах важное значение имеет формирование взрывоопасной среды при внезапных выбросах угля и газа. В работах по исследованию внезапных выбросов [1, 2, 3] уделено значительное внимание вопросам процесса протекания внезапного выброса и его особенностей. Однако характер нарастания концентрации метана и загазувания выработок изучены недостаточно и требуется проведение дополнительных исследований, что определяет **актуальность настоящей публикации.**

**Целью исследований** является установление зависимости концентрации метана при выбросе в выработках выемочного участка шахты от основных физических факторов.

**Информационной и методологической базой** работы являются результаты исследований и депрессионных съемок режимов проветривания и связи между объемом выброшенного угля и объемом выделившегося при выбросе метана, а также математическое моделирование процесса образования формирования концентрации метана в выработках угледобывающего участка шахты.

### **Основные результаты исследований**

Рассматривается выброс угля и газа в очистной выработке, например в нижней части лавы, когда опасность загазувания может быть как для самой лавы, так и конвейерной выработки, а также вентиляционной выработки, и даже выработок за пределами выемочного участка.

Обработка статистических данных, описывающих внезапные выбросы угля и газа в лавах, полученные (МакНИИ) за последние 15 лет с 1990-2005 гг. показала, что между ними существует некоторая связь с коэффициентом корреляции 0,5 (рис. 1, жирная линия).

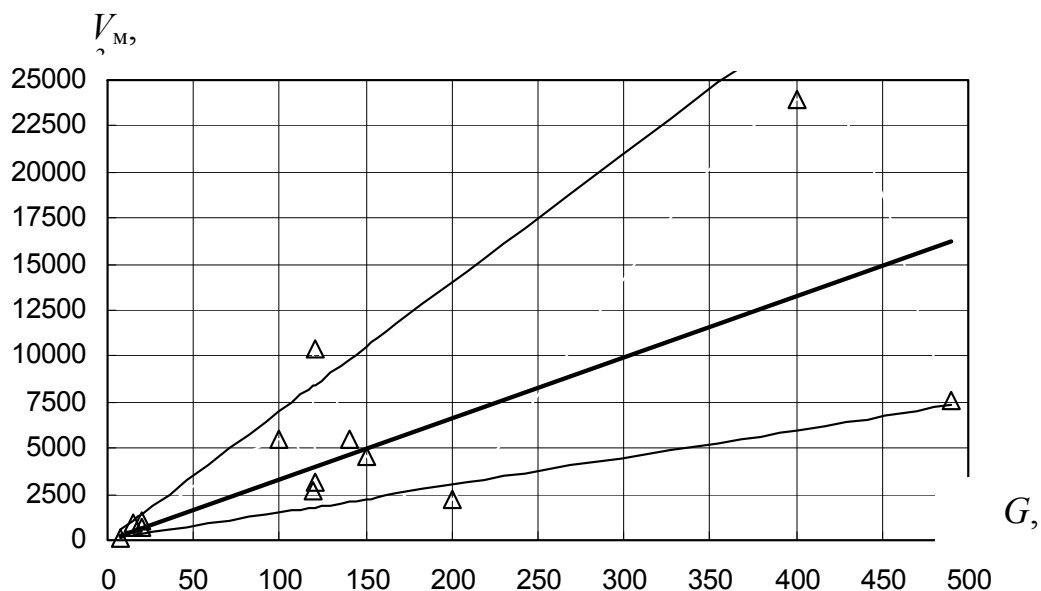


Рис.1.- Корреляционное соотношение между выброшенным углем и газом в лавах (тонкими линиями указан диапазон разброса статистических данных)

Формула связи параметров выброшенных угля и газа имеет вид

$$V_m = qG, \quad (1)$$

где  $q$  – коэффициент пропорциональности (среднее значение –  $33 \text{ м}^3/\text{т}$ , крайние значения соответственно равны  $15$  и  $70 \text{ м}^3/\text{т}$ ), соответствующий газоносности угля.

В результате обработки данных установлено, что среднестатистическое количество угля  $G_{cp}$ , выброшенного в лаву -  $G_{cp} = 146 \text{ т}$ . Это позволяет использовать полученные результаты, как исходные данные для прогноза загазирования выработок при выбросах угля и газа в лавы.

Для исследования влияния выброса газа на устойчивость проветривания выработок вентиляционной сети произведено моделирование воздушораспределения в вентиляционных сетях шести шахт Донбасса. Три шахты пологого падения: «Моспинская» и «Мушкетовская-Вертикальная» ПО «Донецкуголь» и «Киевская» ПО «Артёмуголь»; три шахты крутого падения: «Юный коммунар» и №3 ПО «Орджоникидзеуголь» и «Александр-Запад» ПО «Артёмуголь». Число ветвей в вентиляционных сетях составляло  $120 - 430$ . Исходным материалом при изучении нарушения режимов проветривания служили данные депрессионных съёмок шахт.

В качестве примера на рис. 2 приведена обобщенная схема проветривания шахты «Александр-Запад». На момент проведения депрессионной съёмки очистные работы велись на одном горизонте. В работе находились 6 лав на двух крыльях.

Выброс моделировался (как расход дополнительного вентилятора) в трёх лавах  $9 - 10$ ,  $38 - 39$  и  $31 - 32$ .

Анализ показывает, что расход воздуха в выработках с поступающей и исходящей струями представляет собой по сути линейную зависимость от интен-

сивности выброса газа.

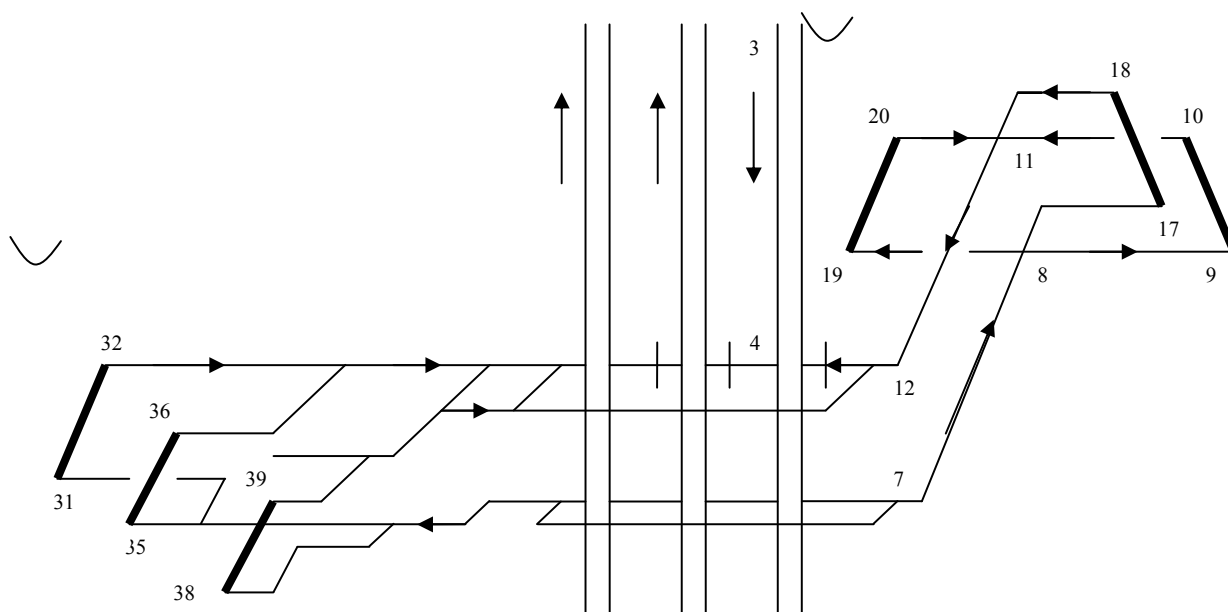


Рис. 2.- Обобщенная схема вентиляции шахты «Александр-Запад».

Исходя из среднестатистической интенсивности выбросов угля для конкретной шахты и конкретной выработки (лавы или тупиковой выработки), можно определить ожидаемую интенсивность выброса метана по формуле

$$I = Gq_n / t_0, \quad (2)$$

где  $G$  – количество выброшенного угля, т;  
 $q_n$  – природная метаноёмкость угля, м<sup>3</sup>/т;

$t_0$  – продолжительность выброса (по данным [1, 2] находится в пределах от 1 с до нескольких минут), с.

Продолжительность выброса, по нашему мнению, должна определяться в соответствии со скоростью выноса угля и газа, которая не превышает 15 м/с [3].

Анализ ликвидации последствий газодинамических явлений (выбросов угля и газа), начиная с 1966 г., показал, что при выбросах в лавах, разрабатывающих пологие и наклонные пласты (шахты им. М.И. Калинина, «Заперевальная», №17-17 бис и др.), нарушение проветривания после выброса чаще всего выражается в частичном сокращении расхода воздуха до 120 – 240 м<sup>3</sup>/мин (40% случаев) и реже – почти в полном прекращении проветривания, что можно объяснить сравнительно небольшим количеством выброшенной массы угля до 180 т и большим начальным расходом воздуха 500 – 800 м<sup>3</sup>/мин.

В то же время на пластах крутого падения (шахты «Юнком», им. Карла Маркса, №8 им. Гаевского и др.), где начальный расход воздуха составлял 300 – 500 м<sup>3</sup>/с, количество выброшенной массы угля доходило до 400 – 500 и даже 1700 т, газодинамическое явление приводило к нарушению проветривания в

50% случаев, а почти полное прекращение проветривания наблюдалось до 25% случаев.

Аналитическая зависимость коэффициента уменьшения расхода воздуха от количества выброшенной массы породы и угля ( $k$ ) установлена из соображения равенства депрессий на выемочном участке до и после выброса. На основании этого можно принять

$$RQ_0^2 = (R + \Delta R)Q^2, \quad (3)$$

где  $R$  – аэродинамическое сопротивление выемочного участка, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;

$\Delta R$  – дополнительное аэродинамическое сопротивление за счёт выброшенной породы и угля, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>.

Поскольку дополнительное аэродинамическое сопротивление зависит от массы выброшенной породы и угля, коэффициент уменьшения расхода воздуха ( $k$ ), вследствие перекрытия сечения выработки будет равен

$$k = Q/Q_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta R/R}} = \frac{1}{\sqrt{1 + a(G - G_0)}}, \quad (4)$$

где  $a$  – эмпирическая константа, 1/т;

$G_0$  – количество выброшенной массы угля, меньше которой расход воздуха на выемочном участке практически не меняется, т.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при выбросах угля в количестве 20 т и менее расход воздуха, как правило, не уменьшается. Это говорит о том, что при углах естественного откоса выброшенной массы в количестве 20 т и насыпной плотности 1 т/м<sup>3</sup> угля, они едва будут достигать кровли выработки шириной 3 м и высотой 2,7 м.

При выбросе угля больше 20 т почти полностью перекрывается сечение выработки и образуется местное аэродинамическое сопротивление, в результате чего воздух резко сократится, о чём свидетельствуют данные расчётов и экспериментов.

По количеству выброшенных породы и угля при выбросе можно определить, насколько уменьшился расход воздуха в выработке и как быстро происходит формирование взрывоопасной среды за пределами зоны выброса газа.

Принимая, что в результате выброса загазировавшая часть конвейерной выработки, лава и часть вентиляционной выработки и считая, что предыдущий газовый фон концентрации метана  $C_0$  не успевает измениться, получена следующая зависимость общей концентрации метана от влияющих факторов для моделирования процесса загазирования выработок выемочного участка:

$$\Delta C = 50 \left[ \Phi \left( \frac{Ho + \lambda_2 - x/l}{2\sqrt{Ho/Pe}} \right) - \Phi \left( \frac{Ho + \lambda_1 - x/l}{2\sqrt{Ho/Pe}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\Delta C = 100[C - C_0 - \Delta C(x)]$  – отклонение концентрации метана на выемочном участке от её начального распределения, %;

$$\Phi(x) - \text{интервал вероятности, } \Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\zeta^2) d\zeta \quad [4]$$

$Ho = \frac{nkQ_0 t}{Sl}$  – критерий гомохронности или кратности обмена воздуха на выемочном участке;

$$Pe = \frac{nkQ_0 l}{SD_x} - \text{число Пекле диффузионного переноса;}$$

$\lambda_1 = (l_1 - l_k)/l$  и  $\lambda_2 = (l_1 + l_6)/l$  – относительное расстояние соответственно до начала и конца загазированной зоны на момент выброса;

$l_k$  – длина загаживания квершлага или уклона, м;

$l$  – длина всех выработок выемочного участка, м;

$l_1$  – длина конвейерной выработки, м;

$l_B$  – длина загазированной части выработки, м.

При моделировании принято, что концентрация метана при выбросе  $C_6 - C_1 \approx 100\%$ , поскольку газовый фон концентрации на выемочном участке в нормальных условиях перед выбросом  $C_1 \leq 1\%$ .

На рис. 4 представлены результаты математического моделирования загаживания выработок выемочного участка при диффузионном числе Пекле  $Pe = 100$  и различных значениях критерия гомохронности  $Ho = 0,0001; 0,1; 0,4$  и  $0,7$ .

При длине лавы  $l_2 - l_1 = 150$  м это будет означать, что в результате выброса угля и газа быстро будет загаживаться вся лава ( $Ho = 0,001$ ), после чего начинает заполняться метаном вентиляционная выработка. По расположению максимумов концентрации метана в вентиляционной выработке видно, что они будут соответствовать времени 6, 24 и 42 мин, если общая кратность обмена воздуха на выемочном участке составляет, к примеру, 60 мин. Поскольку длина всех выработок участка в данном случае равна  $l = 1500$  м, а длина вентиляционной выработки – 1050 м, то указанные максимумы будут находиться на расстояниях от окна лавы 75, 525 и 975 м.

Входящий в число Пекле коэффициент турбулентной диффузии может быть определён согласно [5] по формуле

$$D_x = 4,43(ud)^{2/3}, \quad (6)$$

где  $d$  – средний диаметр выработок по пути движения газовой волны, м;  
 $u$  – скорость движения воздуха, м/с.

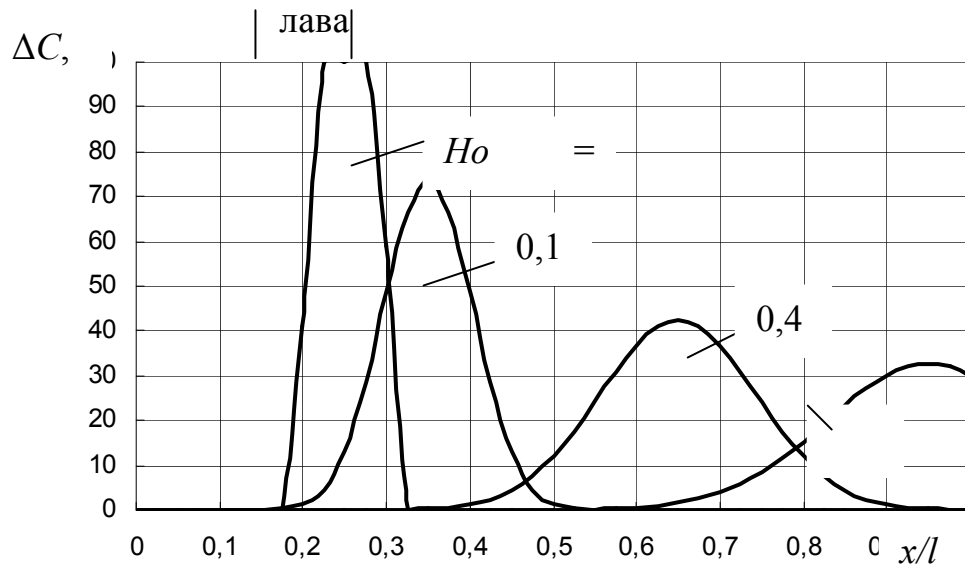


Рис. 4. -Распределение концентрации метана по длине выработок ( $x$ ) выемочного участка, отнесенной к общей длине выработок выемочного участка ( $l$ ) в различные промежутки времени после выброса газа

Так, при скорости движения воздуха  $u = 0,4$  м/с и диаметре выработок  $d = 3,5$  м, получим  $D_x = 5,5$  м<sup>2</sup>/с. В этом случае число Пекле  $Pe = 100$ , а время однократного обмена воздуха на выемочном участке будет равно  $t_{об} = 60$  мин.

При критерии гомохронности  $Ho \geq 0,1Pe(\lambda_2 - \lambda_1)^2$  вместо интегральной зависимости (5) можно использовать полученную формулу:

$$\Delta C = 50 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\sqrt{\pi Ho / Pe}} \left[ \exp \left( - \frac{[Ho + (\lambda_1 + \lambda_2)/2 - x/l]^2}{4Ho / Pe} \right) \right] \quad (7)$$

Расчёты по формулам (5) и (7) показывают, что максимальные значения совпадают и могут определяться в соответствии с зависимостью

$$\Delta C = 50 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\sqrt{\pi Ho / Pe}} \quad (8)$$

В размерном виде формула (8) имеет вид

$$\Delta C_m = 50 \frac{l'_e + l'_k}{\sqrt{\pi D_x t_{кр}}}, \quad (9)$$

где  $t_{кр}$  – время однократного обмена воздуха от места выброса до заданного расстояния от лавы, с.

Формула (9) может быть использована для оценки газовой ситуации в выработках с исходящими струями воздуха за пределами выемочного участка вплоть до вентилятора главного проветривания. В этом случае время однократного обмена воздуха в рассматриваемом объёме будет равно

$$t_{кр} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{u_i}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество выработок до рассматриваемого расстояния, включая и лаву;

$l_i$  – длина  $i$ -ой выработки, м;

$u_i$  – скорость воздуха в  $i$ -ой выработке, м/с.

Тогда с учётом разбавления метана в исходящих струях формула (9) принимает вид

$$\Delta C_m = 50 \frac{(l_g - l_k) Q_l}{Q \sqrt{\pi D_x \sum_{i=1}^n l_i / u_i}}, \quad (11)$$

где  $Q_l$  – расход воздуха в лаве после выброса, м<sup>3</sup>/с;

$Q$  – расход воздуха на заданном расстоянии от места выброса, м<sup>3</sup>/с.

Входящие в формулу (6) для определения коэффициента турбулентной диффузии средняя скорость воздуха и приведенный диаметр в цепи выработок определяются по формулам

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{u_i}}; \quad d = 2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S_i l_i}{\pi \sum_{i=1}^n l_i}}, \quad (12)$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -й выработки, м.

Полученная формула (11) совместно с формулами (6) и (12) являются наиболее общими для определения зоны загазирования при выбросах на исходящих струях воздуха. На свежих струях воздуха под объёмом выброшенного газа следует принимать ту его часть, которая выходит за пределы конвейерной выработки ( $l_k > l_1$ ) и попадает на квершлаг или уклон. В этом случае в формуле (11) принимается  $l_g - l_k = l_k - l_1$ .

Таким образом обоснована методология определения концентрации метана в выработках очистного участка и получены её зависимости, в том числе и максимального значения от влияющих факторов: расхода и скорости воздуха, коэффициента турбулентной диффузии и длины выработок.

Полученные результаты позволяют оценить условия загазирования и формирования взрывоопасной среды при внезапном выбросе угля и газа на добычном участке угольной шахты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров И.В., Кричевский Р.М. Борьба с внезапными выбросами угля и газа. – К.: Техника, 1964. – 112 с.
2. Агафонов А.В. Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам. – Донецк: Донбасс, 1998. – 238 с.
3. Елен Б., Коласа И., Медведев Б.И., Осокин В.В. Борьба с внезапными выбросами угля и газа на шахтах ЧССР /Безопасность труда в промышленности.- 1973.- №4. – С. 14 – 15.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
5. Греков С.П., Калюсский А.Е. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях. – М.: Недра, 1975. – 120 с.
6. Осипов С.Н. Борьба со взрывами газа в горных выработках. – М.: Недра, 1972. – 160 с.
7. О безопасности работ в период выбросов песчаника и газа. / Ф.А. Абрамов, Г.А. Шевелев, Ю.А. Герасименко и др. / - «Шахтное строительство», 1973, №9. – С. 1 – 3.