

Канд. техн. наук А.В. Боровский,
м.н.с. Л.А. Новиков, м.н.с. А.В. Пицык
(ИГТМ НАН Украины),
канд. техн. наук Б.В. Бокий
(АП "Шахта им. А.Ф. Засядько")

МЕТОД РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ИСХОДЯЩЕЙ СТРУЕ ДЛИННОЙ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ

У роботі розглянуто характер газорозподілу по довжині тупикової виробки та розроблено метод розрахунку концентрації метану у вихідній струменеві довгої тупикової виробки.

THE METHOD ACCOUNT CONCENTRATION OF METHANE IN OUTGOING JET FOR LONG DEADLOCK EXCAVATION

In work the character distribution of gas on length deadlock development is considered and method account concentration of methane in initial jet for long deadlock excavation is developed.

При подготовке длинных выемочных столбов оконтуривающие их выработки обычно проводят высокими темпами. Проведение таких выработок по газоносным пластам сопровождается интенсивным газовыделением, которое пропорционально скорости подвигания забоев. Выделение метана в подготовительные забои происходит из обнаженных поверхностей пласта, боковых пород и отбитого угля. В этих условиях безопасность работ и производительность труда проходчиков определяются эффективностью и надежностью проветривания длинных тупиковых выработок.

При отсутствии суфлярных и внезапных выделений метана, газообильность тупиковых выработок большой протяженности практически не влияет на темпы подвигания. Тем не менее, наличие информации о распределении концентрации метана в исходящей струе тупиковой выработки, а также поиск эффективного метода расчета основных параметров системы «источник газоразделения-объект проветривания» в зависимости от вида работ и режимов проветривания, является актуальной задачей. Количественная оценка газораспределения на длине выработки обеспечивает постоянный контроль параметров рудничной атмосферы, своевременное обнаружение опасных ситуаций и создает условия для наиболее полного использования мощностей проходческих комбайнов по газовому фактору.

В данной работе изложены принципы разработки расчетного метода определения концентрации метана в заданной точке исходящей струи длинной тупиковой выработки.

Известно, что разжижение метана в подготовительном забое и последующее удаление газозооной смеси из длинной тупиковой выработки происходит под действием конвективного переноса, градиента скорости и ее турбулентных пульсаций [1]. Перенос метана в продольном и поперечном направлениях определяется величинами продольных и поперечных составляющих коэффициента турбулентной диффузии. Во всем объеме выделяющегося ме-

тана турбулентная диффузия во много раз превышает молекулярную диффузию. При этом она тем выше, чем выше уровень турбулентности. Турбулентное перемешивание сопровождается значительным расширением поверхности раздела между частицами метана и воздуха и увеличением градиента на этой поверхности.

При решении данной задачи использованы следующие исходные данные:

- результаты газовоздушных съемок, выполненных в ремонтные и рабочие смены в период проведения 10-го западного конвейерного штрека по пласту l_1 на шахте им. А.Ф. Засядько [2];
- уравнение, описывающее процесс конвективно-диффузионного переноса газа в турбулентном потоке [3];
- значения коэффициентов турбулентной диффузии для штрекообразных выработок с арочной крепью [4].

Уравнение, описывающее диффузионный процесс в турбулентном потоке, выведено из интегрального уравнения вероятностей на основе теории Тейлора [5], с учетом неразрывности движения. В общем виде диффузионный процесс (без учета вертикальной составляющей) в плоском турбулентном потоке, имеющего среднюю скорость $\bar{U}$ в направлении его движения, описывается уравнением

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + \bar{U}_x \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1)$$

где D_x и D_y – коэффициенты турбулентной диффузии, соответственно в продольном и поперечном направлениях воздушного потока, $\text{м}^2/\text{с}$; C – концентрация метана, %; τ – время, с.

Решение задачи об оценке газораспределения значительно упрощается, если принять допущение, что в условиях подготовительной выработки коэффициенты турбулентной диффузии остаются постоянными величинами. Тогда, рассматривая изменение турбулентной диффузии отдельно по направлениям x и y , приходим к следующему виду уравнения (1):

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + \bar{U}_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

$$D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + \bar{U}_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

В уравнении (2) коэффициентом турбулентной диффузии D_x можно пренебречь, поскольку перенос метана конвективным потоком в этом же направлении намного превышает перенос газа за счет диффузии. Кроме того, для упрощения решения задачи принимаем следующие допущения:

- движущийся по выработке газоздушный поток плоский, т.е. $\frac{\partial}{\partial z} = 0$;
- составляющие уравнения, содержащие коэффициент молекулярной диффузии, исключаются вследствие малозначительности последнего;
- сложный вид функций D_y и U_x в поперечном направлении условно сводим к простому, полагая, что

$$D_y = \text{const и } U_x(y) = \text{const}$$

В частности, согласно [4] численное значение коэффициента турбулентной диффузии в поперечном направлении определяется как

$$D_y = 0,00055 \bar{U} \quad (4)$$

Принятые упрощающие допущения, что в турбулентном ядре скорость потока постоянна и равна средней его скорости, а ядро течения распространяется на всю ширину выработки, т.е. пристеночное ламинарное течение и пограничный слой отсутствуют. При таких условиях уравнение (1) принимает вид

$$\bar{U} \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (5)$$

Решение задачи об определении концентрации метана в любой точке вентиляционного потока подготовительной выработки следует, прежде всего, связывать с интенсивностью и характером изменения газообильности этого потока, представляющего собой исходящую струю. Воспользуемся такой связью, вытекающей из результатов газоздушных съемок, проведенных в длинной тупиковой выработке на шахте им. А.Ф. Засядько [2].

В таблицах 1 и 2 приведены результаты шахтных измерений, где Q_i и q_i – соответственно расход исходящей струи и дебит метана в i – той замерной станции, м³/мин; $q_{скв}$ – дебит метана из дегазационных скважин (скважины пробурены по угольному пласту с целью предварительной дегазации) на участке штрека между замерными станциями, л/мин; Δl_i – расстояние между замерными станциями, м.

Таблица 1 – Результаты измерений воздухо- и газораспределения в замерных станциях (10-й западный конвейерный штрек по пласту l_1 , ремонтная смена, 03.01.2002 г.)

Замерные станции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_i , м ³ /мин	646	621	608	-	581	569	552	456	455
q_i , м ³ /мин	1,73	1,65	1,6	-	1,43	1,41	1,37	0,91	0,83
$q_{скв}$, л/мин	61	28	25	25	41	50	-	-	-
Δl_i , м	20	17,9	32,1	40	58,6	33,5	446,5	72,1	20

Таблица 2 – Результаты измерений воздухо- и газораспределения в замерных станциях (10-й западный конвейерный штрек по пласту l_1 , рабочая смена, 04.01.2002 г.)

Замерные станции	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_i, \text{м}^3/\text{мин}$	716	672	-	-	-	-	579	498	474
$q_i, \text{м}^3/\text{мин}$	4,12	4,01	-	-	-	-	3,46	2,43	2,36
$q_{\text{св}}, \text{л}/\text{мин}$	63	30	30	30	30	30	-	-	-
$\Delta l_i, \text{м}$	20	17,9	32,1	40	58,6	33,5	446,5	72,1	20

По результатам измерений воздухо- и газораспределения, приведенным в таблицах 1 и 2 построены зависимости относительного газовыделения $q_{oi} = \frac{q_i}{q_1}$ от положения замерных станций по отношению к забою тупиковой выработки (рис. 1, 2).

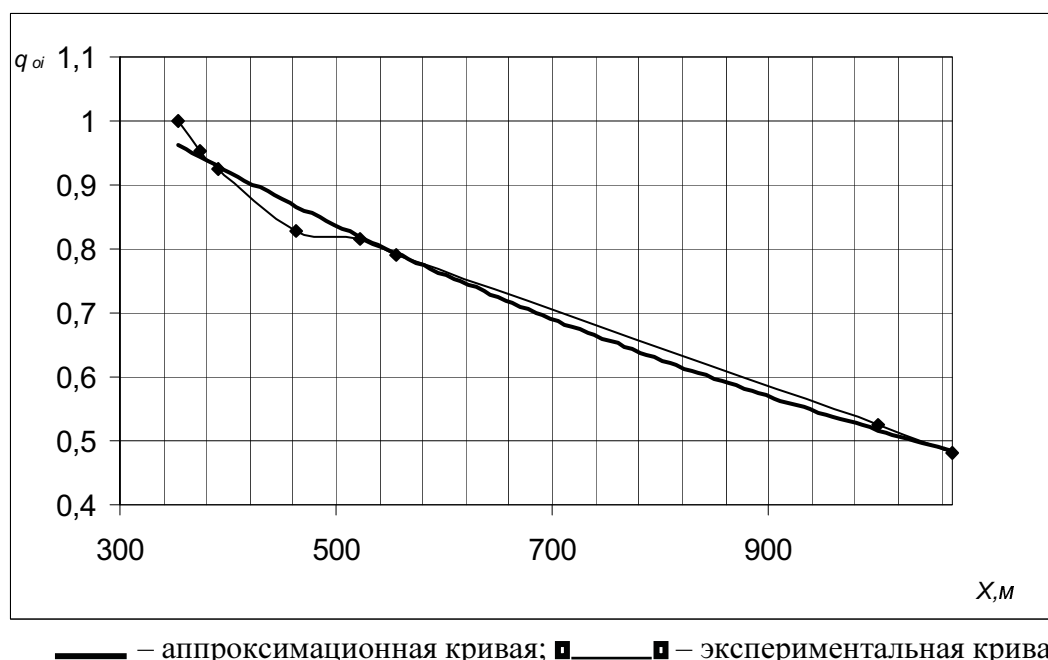
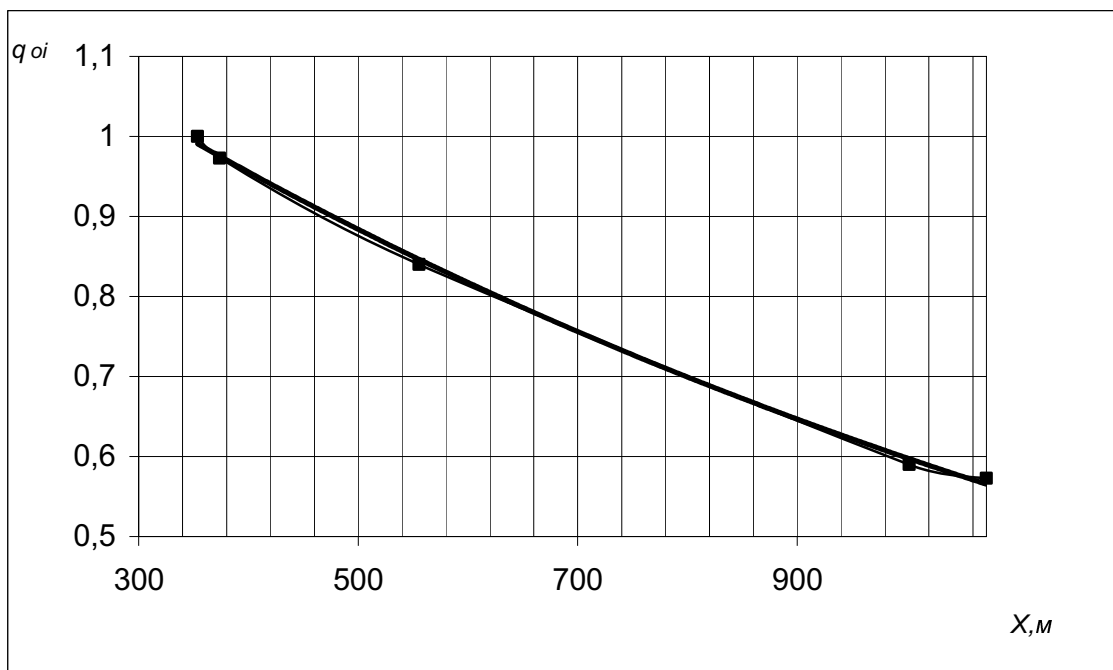


Рис. 1 – Характер изменения газообильности исходящей струи длинной тупиковой выработки (03.01.2002 г.)

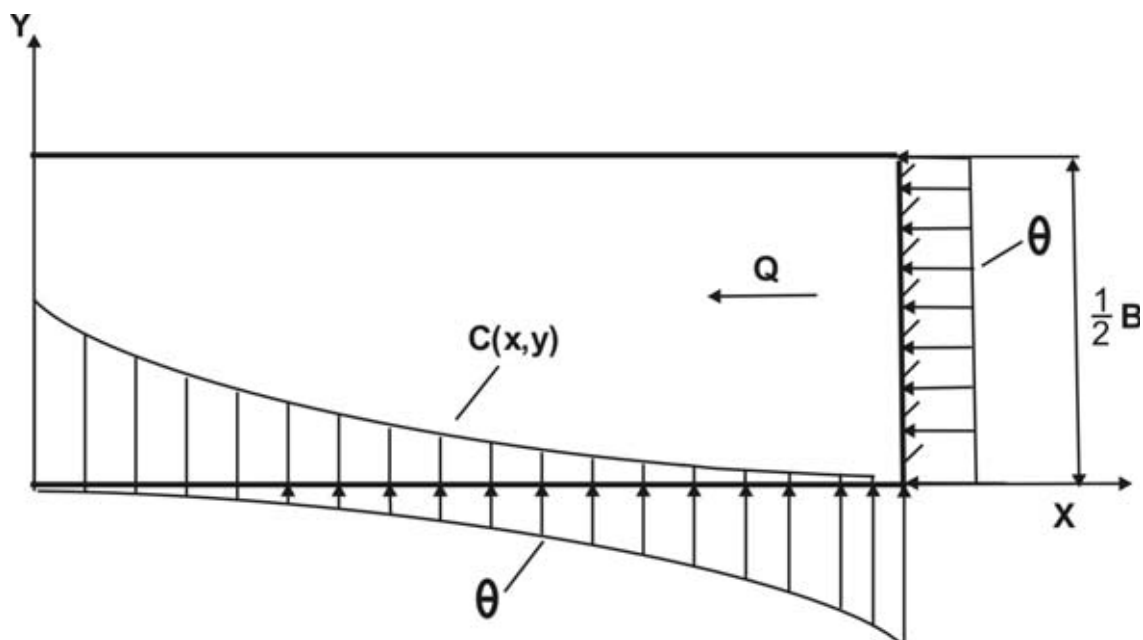
Приведенные на рис.1 и рис.2 аппроксимационные кривые соответственно описываются экспоненциальными зависимостями: $q_{oi} = 1,3547 \cdot e^{-0,0009 \cdot x}$; $q_{oi} = 1,3057 \cdot e^{-0,0008 \cdot x}$. Взаиморасположение экспериментальных и аппроксимационных кривых позволяет, согласно [3], считать, что аппроксимационные кривые практически соответствуют экспериментально установленному характеру изменения дебита газа в исходящей вентиляционной струе. В данном случае имеет место характер газораспределения по длине тупиковой выработки при работе проходческого комбайна, т.е. когда распределение концентрации метана экспоненциально зависит от расстояния между данной точкой и местом работы комбайна (рис. 3). Начало системы координат связано с ме-

стоположением комбайна и началом газовыделения $q'_c(x) = q_{c_0}(e^x - 1)$, где q_{c_0} – газовыделение в начальном сечении.



— аппроксимационная кривая; — экспериментальная кривая.

Рис. 2 – Характер изменения газообильности исходящей струи длинной тупиковой выработки (04.01.2002 г.)



//// - забой; Q – расход исходящей струи, м³/мин; $C(x,y)$ – концентрация метана, %;

B – ширина выработки, м; θ – газовыделение со стенок выработки, м³/мин

Рис. 3 – Характер газораспределения в исходящей струе при экспоненциальном законе газовыделения со стенок тупиковой выработки.

Граничные условия для данного характера газовыделения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} &= BG(e^{\varphi\Delta} - 1), \\ \frac{\partial C}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} &= 0, \\ C|_{\Delta=0} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\Delta = \frac{x}{B}$; $\eta = \frac{B-y}{B}$; $\varphi = aB$; $G = q_{c_0} D_\mu^{-1}$; $D_\mu = 0.196 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ – величина коэффициента молекулярной диффузии для метана [6].

После сведения граничных условий (6) к однородным с помощью замены

$$C(\Delta, \eta) = \frac{1}{2} BG(e^{\varphi\Delta} - 1)\eta^2 + W(\Delta, \eta) \quad (7)$$

выражение (5) и граничные условия (6) примут вид

$$\frac{\partial W}{\partial \Delta} - \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial \eta^2} = \frac{BG}{R} \left[e^{\varphi\Delta} \left(1 - R\varphi \frac{\eta^2}{2} \right) - 1 \right] \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} &= 0, \\ \frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} &= 0, \\ W|_{\Delta=0} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $R = \bar{u} B D_y^{-1}$ – аналог числа Рейнольдса.

Решение уравнения (8) с граничными условиями (9) приобретает вид

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(\Delta) \cos(\pi n \eta)$$

Функциональная зависимость в правой части уравнения (8) обладает симметрией первого рода, т.е

$$f(\Delta, \eta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n(\Delta) \cos(\pi n \eta) = BG \left[\frac{e^{\varphi \Delta} - 1}{R} - \frac{\varphi e^{\varphi \Delta}}{6} \right] + \frac{2BG}{\pi^2} \varphi e^{\varphi \Delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos(\pi n \eta)$$

После подстановки полученного выражения для $f(\Delta, \eta)$ в (8), получаем дифференциальные уравнения для определения X_0 и X_n

$$\frac{\partial X_0}{\partial \Delta} = BG \left[\frac{e^{\varphi \Delta} - 1}{R} - \frac{\varphi e^{\varphi \Delta}}{6} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial X_n}{\partial \Delta} + \frac{(\pi n)^2}{R} X_n = \frac{2BG}{\pi^2} \varphi e^{\varphi \Delta} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \quad (11)$$

Решения дифференциальных уравнений (10) и (11) имеют вид:

$$X_0 = BG \left[(\varphi^{-1} R^{-1} - 6^{-1}) (e^{\varphi \Delta} - 1) \right], \quad (12)$$

$$X_n = \frac{2BG}{\pi^2} \varphi \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \frac{e^{\varphi \Delta} - e^{-(\pi n)^2 \Delta R^{-1}}}{\varphi + R^{-1} (\pi n)^2} \quad (13)$$

Подставляя в соотношение (7) выражения (12) и (13), получаем формулу для расчета концентрации метана в любой точке исходящей струи длинной тупиковой выработки

$$C(\Delta, \eta) = BG \left(e^{\varphi \Delta} - 1 \right) \left(\frac{\eta^2}{2} + \frac{1}{\varphi R} - \frac{1}{6} \right) - \frac{\Delta}{R} + \frac{2\varphi}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \frac{e^{\varphi \Delta} - e^{-(\pi n)^2 \Delta R^{-1}}}{\varphi + R^{-1} (\pi n)^2} \quad (14)$$

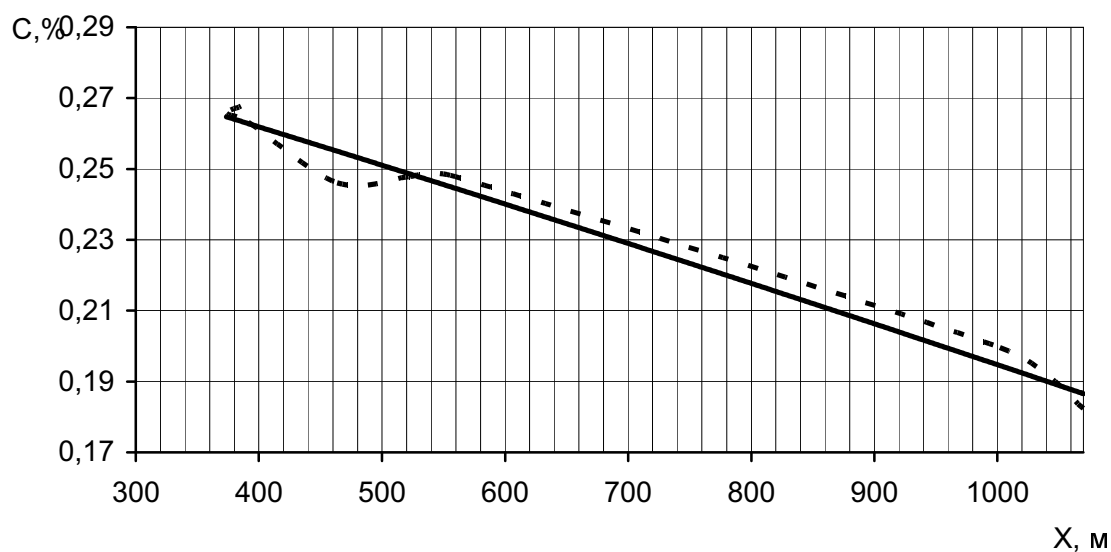
На рис. 4, 5 представлены результаты сравнения распределения средней концентрации метана по длине тупиковой выработки, рассчитанной по формуле (14), со средними значениями концентрации метана в той же выработке [2], измеренных экспериментально

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

- на основе результатов шахтных экспериментов и данных об интенсивности переноса метана в конвективно-диффузионном потоке разработан расчетный метод определения концентрации метана в исходящей струе длинной тупиковой выработки;

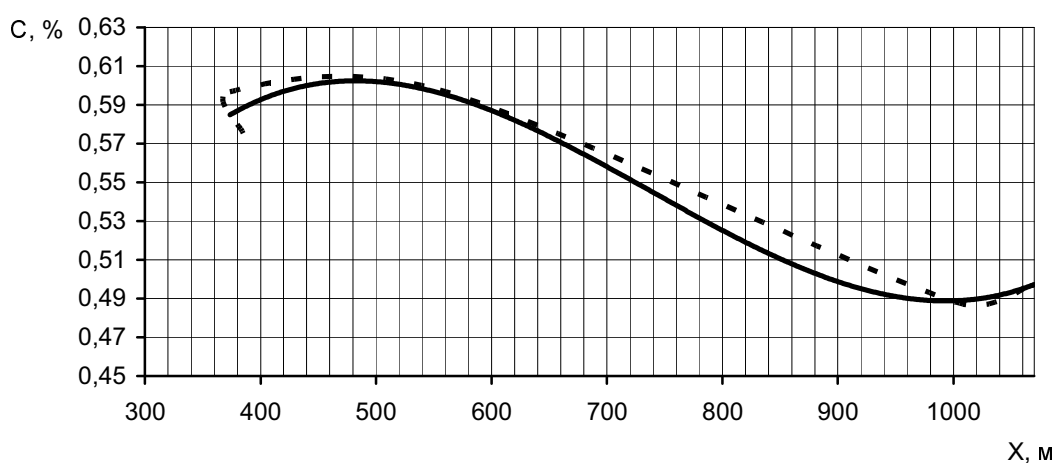
- погрешность между расчетными и экспериментальными результатами составляет 3% ÷ 5%. В основе погрешности находится влияние не учтенных вязких слоев и возможное несоответствие принимаемой расчетной величины

коэффициента турбулентной диффузии его истинному значению;



— - теоретическая кривая; - экспериментальная кривая

Рис. 4 – Распределение концентрации метана по длине тупиковой выработки (03.01.2002 г.)



— - теоретическая кривая; - экспериментальная кривая

Рис. 5 – Распределение концентрации метана по длине тупиковой выработки (04.01.2002 г.)

– при известной величине средней концентрации метана в одном из поперечных сечений тупиковой выработки, руководствуясь выражением (14) можно определять величину концентрации метана в любой точке исходящей струи;

– расчетный метод пригоден для прогнозирования газораспределения в тупиковых выработках, имеющих различные режимы проветривания и проводимых в любых горно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клебанов Ф.С., Мартынюк Г.К. Распределение примеси в вентиляционной струе от точечного и линейного источника. «Научные сообщения», №77, Сб. ИГД им. А.А. Скочинского, М., 1970.
2. Б.В. Бокий, А.В. Боровский, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин. Аэрогазодинамика длинной тупиковой выработки в период подготовки и дегазации выемочного столба // Геотехническая механика: Меж-вед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова. – Днепропетровск. – 2002. – Вып. 33. – С. 114-120.
3. Методы расчета распределения концентрации метана в призабойном пространстве / Андрейченко Т.А., Боровский А.В., Волков В.И., Грецингер Б.Е. / ВИНТИ. Сектор теории и методики депонирования научных работ. – Днепропетровск, 1974. – С. 2-4. Рег. № 3020-74. Деп.
4. Справочник по рудничной вентиляции. Под ред. К.З. Ушакова. М., «Недра», 1977. – С. 138.
5. E.M. Airey. Diffusion of firedamp in mine airways "Mining Engr.", № 100, 1969.
6. Н.Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972. – С. 644.

УДК 622.233.623

Канд. техн. наук В.С. Демченко
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СТАВА СТАНКОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ ДЛИННЫХ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА

Наведено методику визначення і результати зміни гідравлічного тиску в циркуляційній системі "насосна установка – буровий став – свердловина".

THE ADMISSION CAPACITY RESEARCHING OF THE DRILLING ASSEMBLY FOR DRILLING THE LONG BORE WITH THE NARROW DIAMETER

There are determination method and results of hydraulic pressure variation in the circulation system: "discharging pump – drilling assembly – bore".

Способ выдачи продуктов разрушения в значительной мере определяет эффективность бурения и санитарно-гигиенические условия труда рабочих. При бурении восстающих скважин различного назначения в пластах крутого падения широко применяется способ удаления продуктов бурения под действием собственного веса, отличающийся простотой и надежностью. Недостатком этого способа является ограниченная область применения.

Определенный интерес представляет способ выдачи штыба продувкой, снижающей в газодинамических пластах вероятность выброса угля и газа при бурении. Применение сжатого воздуха для удаления продуктов разрушения вызывает увеличение запыленности шахтной среды, что отрицательно сказывается на санитарно-гигиенических условиях труда.

Проблема пылеподавления при бурении полностью решается в случае удаления бурового штыба водой. Этот способ применяется при бурении скважин различного назначения диаметром 45-120 мм и длиной до 300 м и является наиболее универсальным. Условия промывки водой оказывает существенную роль на скорость бурения. В связи с этим возникает необходимость исследования пропускной способности циркуляционной системы "насосная установка – буро-