

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев Г.А., Лукинов В.В. Газоносность горных пород Донбасса. Геотехническая механика, Вып 33. – 2004. – С. 3-6.
2. Абрамов Ф.А., Шевелев Г.А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора. - Киев: Наук. думка, 1972.- 285 с.
3. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. - Донецк. ЦБНТИ, 1994. - 202 с.

УДК 622.817

М.н.с. А.П. Круковский,  
м.н.с. В.В. Круковская  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ТЕЧЕНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА В НЕГЕРМЕТИЧНОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

Розв'язана задача руху двокомпонентної метано-повітряної суміші у негерметичному трубопроводі за допомогою методу кінцевих елементів. Наведено розподіли тиску, швидкостей руху, витрат і концентрації метану у МПС.

### **TWO-COMPONENTAL GAS FLOW IN UNTIGHT PIPELINE**

The task of two-componental methane-air mix movement in untight pipeline at using a method of finite elements is solved. Distributions of pressure, speeds of movement, charges and concentration MAM are resulted.

На современных угольных шахтах для обеспечения основных технологических процессов и создания безопасных условий работы персонала большое значение имеет вопрос повышения эффективности функционирования дегазационных систем. Решение этой проблемы должно базироваться не только на экспериментальных работах, но и на научных исследованиях. Но исследование технологических процессов шахтного производства в реальных условиях – это очень дорогостоящее, а иногда и совсем невозможное мероприятие. Поэтому использование имитационных компьютерных моделей позволяет значительно упростить эту задачу. Компьютерная модель, имитирующая процесс движения метано-воздушной смеси (МВС) по трубопроводу, даст возможность исследовать различные вопросы, связанные, например, с проектированием новых дегазационных систем, с выбором оптимального диаметра трубопровода, с регулированием концентрации метана в МВС, с подключением дополнительных дегазационных участков к уже работающему трубопроводу и многие другие.

В данной работе рассматривается процесс транспортировки МВС по дегазационному трубопроводу от дегазационных скважин добычного участка до энергетической установки (ЭУ), позволяющей использовать метан внутренними энергопотребителями горного предприятия. Этот процесс изучается на имитационной модели, компьютерная реализация которой выполнена с применением метода конечных элементов. Целью работы является определение основных факторов, влияющих на изменение концентрации МВС в газопроводе и их

взаимосвязь.

Понятие дегазационная система объединяет комплексы дегазационных скважин, пробуренных в окрестности действующих лав, систему труб, задвижек, водоотделителей, вакуум-насосную станцию (ВНС) и ЭУ (рис. 1).

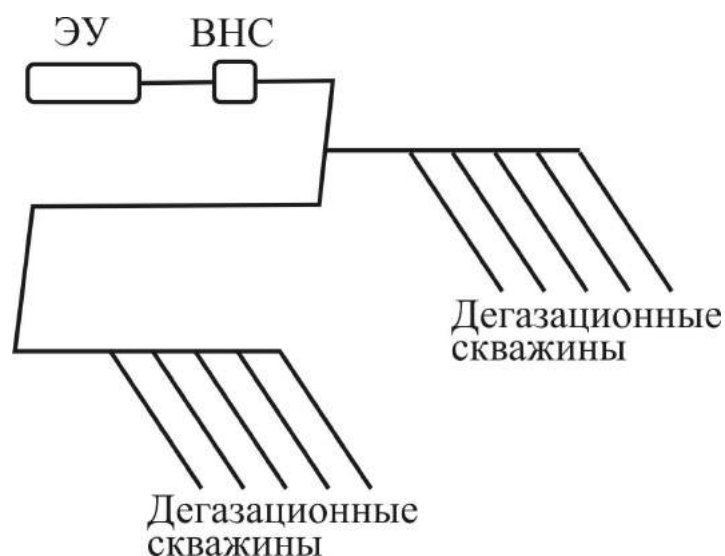


Рис. 1 – Схема дегазационной системы

Для обеспечения эффективной работы ЭУ важно, чтобы на выходе из трубопровода МВС имела необходимую концентрацию. Но из-за подсосов воздуха из горных выработок в газопровод попадает какое-то количество воздуха, зависящее от разности давлений в трубе и выработке, по которой она проложена, диаметра труб, типа соединений участков трубопровода и т.д. Кроме этого, через поврежденные после отхода лавы дегазационные скважины, в дегазационную систему начинает попадать метано-воздушная смесь с низкой концентрацией метана.

Для решения поставленной задачи примем следующие гипотезы и допущения:

- 1) гипотеза сплошности, которая позволяет представить каждую из компонент рассматриваемой смеси как непрерывную, сплошную среду;
- 2) гипотеза взаимопроницаемости – каждая из точек рассматриваемого объема принадлежит обоим компонентам;
- 3) одной точке объема может соответствовать несколько скоростей (по числу компонент);
- 4) одной точке объема может соответствовать только одно значение давления для каждой компоненты.

Доля  $i$ -ой компоненты в общем объеме потока – концентрация  $c_i$  равна:

$$c_i = \frac{V_i}{V},$$

где  $V_i$  – объем, занимаемый  $i$ -ой компонентой,  $V$  – общий объем.

Причем

$$\sum_{i=1}^N c_i = 1,$$

где  $N$  – количество компонент [1, 2].

Основными уравнениями [3], описывающими установившееся движение гомогенной многокомпонентной среды, состоящей из смеси идеальных газов, в негерметичном трубопроводе при отсутствии межкомпонентного взаимодействия являются уравнения сохранения массы:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_i v_{xi}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v_{yi}) = \frac{\partial Q_{подс.возд.}}{\partial t},$$

где  $v_{xi}$  и  $v_{yi}$  – составляющие вектора скорости  $i$ -ой компоненты;  $Q_{подс.возд.}$  – количество подсасываемого воздуха;

уравнения импульса:

$$\begin{aligned} v_{xi} \frac{\partial v_{xi}}{\partial x} + v_{yi} \frac{\partial v_{xi}}{\partial y} &= g_x + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ v_{xi} \frac{\partial v_{yi}}{\partial x} + v_{yi} \frac{\partial v_{yi}}{\partial y} &= g_y + \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p}{\partial y}, \end{aligned}$$

где  $g_x$  и  $g_y$  – составляющие вектора интенсивности объемных сил (силы веса, инерции, действующих на единицу объема),  $p$  – давление газовой смеси;

уравнения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p v_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial p v_{xi}}{\partial y} + \rho_i g_x v_{xi} &= 0, \\ \frac{\partial p v_{yi}}{\partial x} + \frac{\partial p v_{yi}}{\partial y} + \rho_i g_y v_{yi} &= 0. \end{aligned}$$

Решим задачу о движении двухкомпонентной газовой смеси (воздух - метан) по негерметичному трубопроводу, используя численные методы, в частности – метод конечных элементов.

Метод конечных элементов сегодня является не только мощным численным методом расчета, но и средством математического моделирования самых разнообразных физических процессов. Он дает возможность учитывать сложные граничные условия и разнообразные свойства каждого отдельного участка газопровода, такие как диаметр, длина, коэффициент сопротивления, вызванного шероховатостью труб, и сопротивление, обусловленное углом поворота участка

трубопровода.

Основная концепция метода конечных элементов состоит в аппроксимации искомой непрерывной функции набором простых, кусочно-непрерывных функций, заданных на ограниченных областях – конечных элементах.

Если разбить исследуемую систему (см. рис.1) на  $N$  стержневых конечных элементов с узлами  $x_i, y_i, x_j, y_j$ , где  $i, j$  изменяются в пределах от 1 до  $N$ , то давление  $p$  метано-воздушной смеси в узлах  $i, j$  аппроксимируется линейной функцией:

$$p = a_1 + a_2 l, \quad (1)$$

где  $l$  – локальная координата элемента.

Или в матричной форме:

$$\{P\} = [A]\{a\}, \quad (2)$$

где

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & l_i \\ 1 & l_j \end{bmatrix}.$$

Из выражения (2) следует, что

$$\{a\} = [A]^{-1}\{P\}. \quad (3)$$

В результате решения системы линейных уравнений (3) получим:

$$a_1 = p_i; \quad a_2 = \frac{p_j - p_i}{L},$$

где  $L$  – длина элемента.

При подстановке значений  $a_1, a_2$  в (1) получим давление МВС в узлах элемента. Чтобы перейти от значений функции  $P$  в узлах к ее значению в произвольной точке данного элемента с координатами  $x, y$ , вводятся так называемые функции формы. С их помощью давление  $p$  выражается следующим образом:

$$p = N_i p_i + N_j p_j, \quad (4)$$

где  $N_i, N_j$  - функции формы (влияния узлов):

$$N_i = \frac{L-l}{L};$$

$$N_j = \frac{l}{L}.$$

Градиент давления определяется при дифференцировании выражения (2):

$$I_l = \frac{\partial p}{\partial l} = \frac{\partial N_i}{\partial l} p_i + \frac{\partial N_j}{\partial l} p_j = \frac{1}{L}(-p_i + p_j),$$

Или в матричной форме:

$$I = \{B\}\{P\}, \quad (5)$$

Скорость потока,  $v$  – вектор, проекция которого равна объемному потоку через единичную площадку, определяется как

$$v = k I, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент сопротивления на этом участке.

Каждый элемент будет иметь узловые расходы метана в единицу времени  $Q_i, Q_j$ . Причем  $Q_j = Q_i + Q_{\Pi}$ , где  $Q_{\Pi}$  – удельный подсос воздуха на участке, описываемом данным конечным элементом. Заметим, что положительный расход ( $Q_i > 0$ ) соответствует узлу, в котором происходит приток МВС в дегазационную систему, отрицательный – узлу, через который МВС выходит из трубопровода. Если количество втекаемой в  $i$ -ый узел и вытекаемой из него МВС одинаково, то  $Q_i = 0$ .

Связь между узловыми расходами и узловыми давлениями устанавливается согласно известному принципу возможных вариаций напоров: в замкнутой области установившегося потока при возможном бесконечно малом изменении давлений дополнительная работа потока на замкнутом контуре должна быть равна соответствующей дополнительной работе в пределах области [4, 5].

Дополнительная работа потока на контуре  $A_K$  равна сумме произведений узловых расходов и вариаций давлений:

$$A_K = \{Q\}^T \{\partial p\}. \quad (7)$$

Вариация градиента давления равна (из соотношения (5)):

$$\partial I = \{B\}\{\partial p\}. \quad (8)$$

Дополнительная работа потока в пределах элемента  $A_{BH}$  равна интегралу по объему элемента от произведения скорости на вариации градиентов давления:

$$A_{BH} = \int_V (v \partial I) dv = \frac{\pi D^2 L}{4} \int_0^L (v \partial I) dl. \quad (9)$$

Разбиение интеграла по длине (площади, объему) на сумму интегралов по элементам дает возможность учитывать свойства каждого элемента в отдельности. Это является важной особенностью метода конечных элементов.

Приравнявая выражения (7) и (9), и при подстановке в них выражений (6) и (8) получим:

$$\{Q\} = \frac{\pi D^2 k}{4} \int_0^L \{B\}^T \{B\} \{P\} dl. \quad (10)$$

Или

$$\{Q\} = [K] \{P\},$$

где  $[K]$  – матрица, характеризующая пропускную способность элемента трубопровода и представляющая собой набор коэффициентов системы линейных уравнений, связывающих  $n$  узловых давлений с  $n$  узловыми расходами. После преобразований она имеет вид:

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{\pi D^2 k}{4L} & -\frac{\pi D^2 k}{4L} \\ -\frac{\pi D^2 k}{4L} & \frac{\pi D^2 k}{4L} \end{bmatrix},$$

где  $D$  – диаметр рассматриваемого участка.

Затем формируется глобальная матрица сопротивления для всей системы, характеризующая пропускную способность газопровода.

Для каждой из компонент – воздуха и метана – справедливы выражения 1 – 10. Но здесь необходимо дополнительно учитывать то, что часть пространства внутри трубопровода занята другими компонентами, что потребуются граничные условия в концентрациях и, конечно, уравнений должно быть решено в  $N$  раз больше [6], так как задача решается для каждой из компонент в отдельности.

В случае двухкомпонентного метано-воздушного потока можно решить сначала задачу о движении всей смеси с учетом подсосов воздуха, а затем отдельно задачу о движении метана, количество которого не изменяется на протяжении всего пути движения. После этого нетрудно вычислить концентрацию метана в исходящей струе. Подсосы воздуха через неплотности фланцевых соединений можно смоделировать различными способами. Например, задать в узлах стержневых

элементов точечные источники чистого воздуха, которые пропускают в трубопровод определенное количество воздуха из выработки в единицу времени. Естественно, это количество будет зависеть от длины конечного элемента, или от числа стыков на данном участке трубопровода. Или, например, ввести в схему дополнительные элементы с поперечным сечением, равным площади трещин, дефектов и т.п. на данном стыке, пропускающем воздух в дегазационную систему, а в качестве граничных условий на внешнем контуре задать давление в выработке, по которой проложен трубопровод. С точки зрения адекватности такая модель будет наиболее точно отражать действительность, так как количество подсасываемого воздуха в ней рассчитывается автоматически в зависимости от разности давлений в трубопроводе и в выработке.

Приведенный выше алгоритм расчета движения двухкомпонентной метано-воздушной смеси по негерметичному трубопроводу был реализован как компьютерное приложение. Для апробации предложенного метода была создана тестовая имитационная модель дегазационной системы, состоящая из двух комплексов дегазационных скважин, пробуренных в окрестности действующих лав, трубопровода и вакуум-насосной станции (рис. 2).

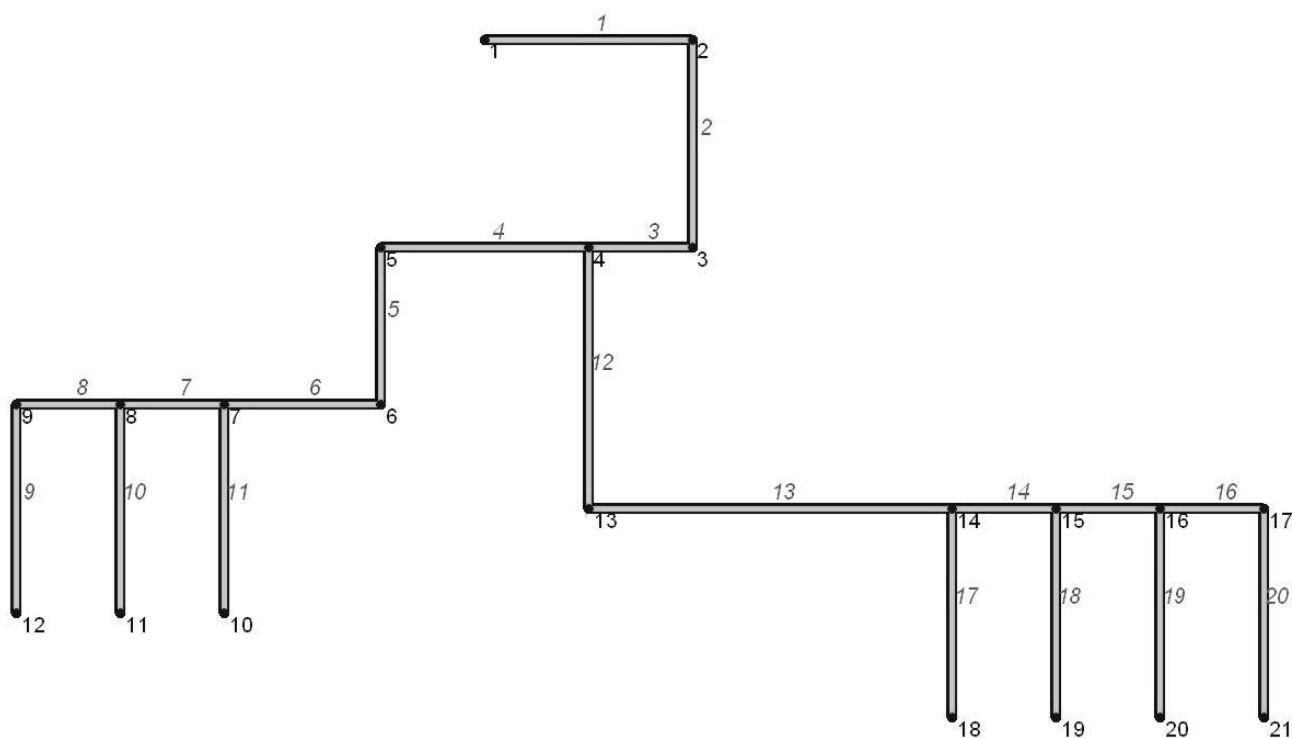


Рис. 2 – Расчетная схема

Элементы 9 – 11 и 17 – 20 моделируют работу дегазационных скважин, остальные – участков трубопровода. Начальные данные, используемые при решении тестовой задачи:

- диаметр всех участков трубопровода – 0,27 м;
- коэффициент проницаемости всех участков трубопровода – 0,9;
- расход МВС в узлах №10-12 – 0,3 м<sup>3</sup>/мин, в узлах №18-21 – 0,5 м<sup>3</sup>/мин;

концентрация метана в МВС в узлах №10-12 –64%, в узлах №18-21 –52%;  
 давление в узле №1 – 10 КПа;  
 длины всех скважин – 40 м;  
 расстояние между ними – 20 м;  
 удельный подсос воздуха – 0,003 м<sup>3</sup>/мин на единицу длины;  
 длины участков трубопровода находятся в пределах от 20 до 70 м.

В результате решения задачи получены данные о распределении давления МВС (рис. 3), распределении скоростей движения МВС на различных участках трубопровода (рис. 4), о расходах МВС и концентрации в ней метана.

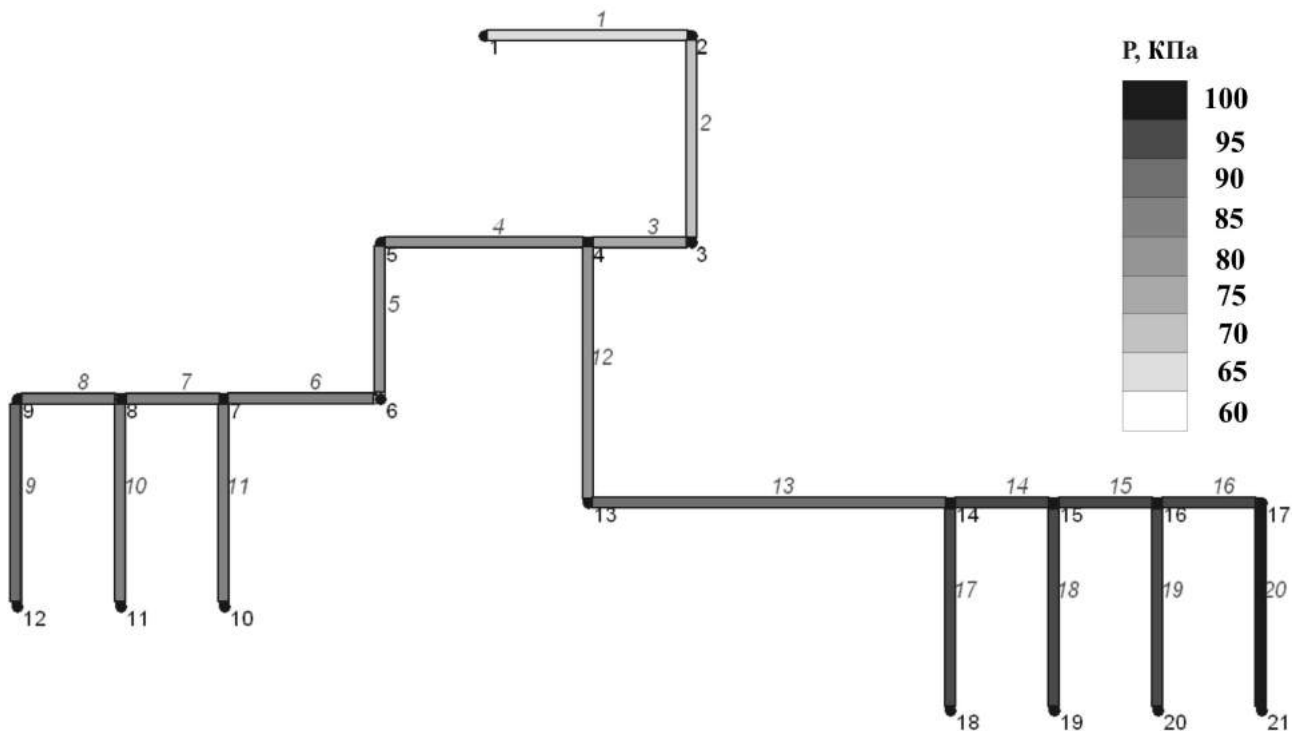


Рис. 3 – Распределение давлений

При таком распределении давления расход МВС в узле №1, на выходе из трубопровода, равен 4,5 м<sup>3</sup>/мин, концентрация метана в исходящем потоке равна 35,75 %.

На основании проведенных вычислительных экспериментов для данной модели были получены зависимости изменения расходов МВС и концентраций метана в ней от величины удельных подсосов воздуха в газопроводе (рис. 5).

Заметим, что при составлении расчетной схемы количество элементов газопровода, таких, как дегазационные скважины, участки трубопровода любой длины, ВНС, задвижки и т.д., не ограничено. Кроме того, возможны любые виды их сочетания и расположения (последовательное, параллельное, кольцевые и их различные комбинации).

Решив задачу таким образом, можно определить факторы, наиболее влияющие на качество МВС в сети (конфигурация и качество трубопровода, его шероховатость, обводненность, количество и углы поворота, типы соединений и



др.), после чего решать инженерные задачи оптимизации ведения и проектирования дегазационных работ с учетом процесса ведения добычи угля.

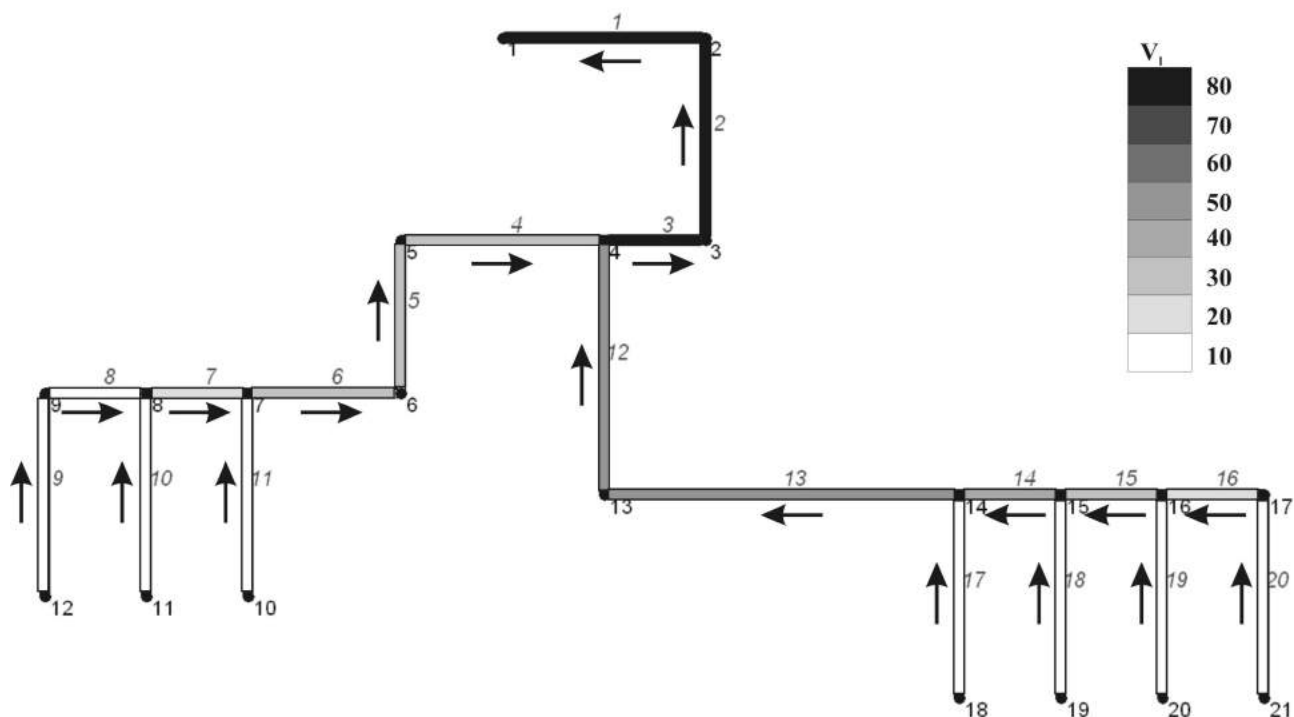


Рис. 4 – Распределение скоростей движения МВС по трубопроводу

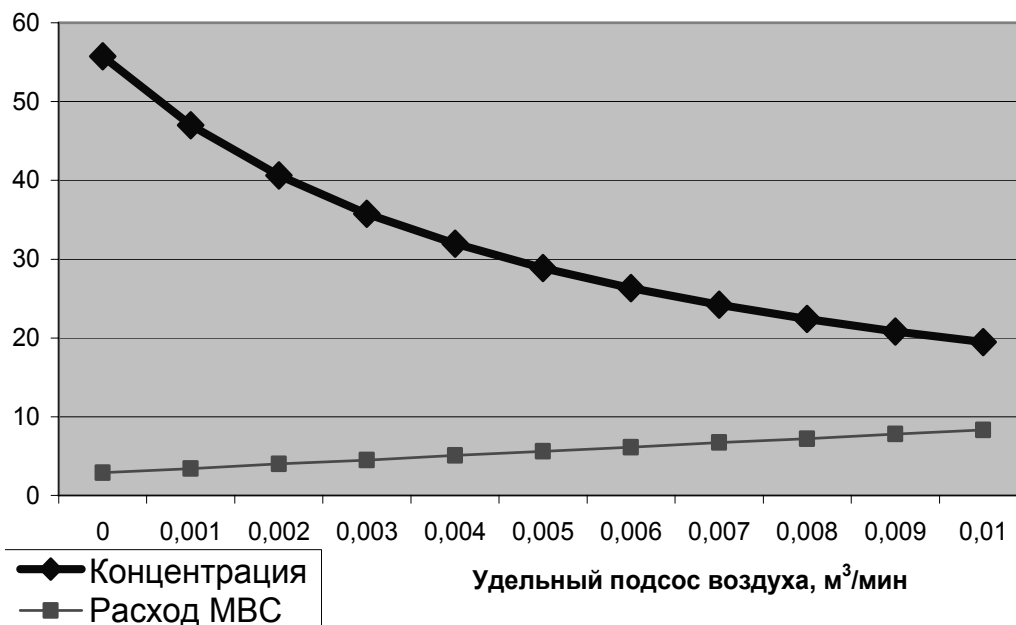


Рис. 5 – Зависимость изменения расходов МВС, м³/мин, и концентраций метана в ней, %, от величины удельных подсосов воздуха в газопроводе

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ентов В.М. Теория фильтрации. Соросовский образовательный журнал. – 1998, №2. – с. 121-128.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. 2 ч. – М. Наука, 1987. – 348 с.
3. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. – Киев. Нау-

кова думка, 2001. – 520 с.

4. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М. Недра, 1975. – 144 с.

5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с. р.

6. Joel H. Ferziger, Milovan Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics. – Springer-Verlag Berlin, 2002. – 424 p.

**УДК 622.411.332.023.623:622.83**

М.н.с. А.П. Круковский  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПОРОДНОЙ ОПОРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНКЕРА ВЫСОКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ**

У статті обґрунтовуються геомеханічні особливості формування опори у покрівлі виробки, яка утворюється анкером високої несучої здатності. Розглянуто вплив встановленого анкера на напружений стан у покрівлі виробки. Виконано аналіз отриманих результатів.

## **FORMATION OF THE ROCK FOOT WITH APPLICATION OF THE ANCHOR OF THE TALL CARRYING CAPACITY**

In the article research formation of abutment overlapping in a roof with anchors of high bearing capacity. Influence of the installed anchor on stress condition of mine roof. The analysis of obtained results is executed.

В настоящее время на шахтах Украины все в больших масштабах применяются анкера нового поколения. Основное их отличие от ранее применяемых анкеров состоит в том, что полимерный закрепитель в широком спектре горно-геологических условий обеспечивает прочность закрепления штанги в шпуре большую, чем разрывная прочность (от 250 до 500 кН) самой стальной штанги.

Опыт применения таких анкеров показал их высокую эффективность, смещения породного контура выемочных штреков с момента возведения крепи в проходческом забое и вплоть до окна лавы в условиях пород II-III категорий устойчивости удается удержать на уровне 20-50 мм [1].

Изучим степень и характер влияния, которое оказывает анкер высокой несущей способности на напряженно-деформированное стояние пород в кровле выработки, и оценим размеры области его воздействия. Для этого вначале необходимо рассмотреть состояние пород кровли для двух случаев. Первый – без установленного анкера, и второй – с установленным в кровле одиночным анкером.

Для данного исследования проведем вычислительный эксперимент. Моделирование выполним с применением метода конечных элементов [2].

Расчетная схема представлена на рис 1. Задача решается в плоской упруго-пластической постановке. Для характеристики прочностных свойств горных пород применяется пластическая модель на основе теории прочности Кулона – Мора.

Размер исследуемой прямоугольной области горного массива: 60 х 60 м, на краях которой заданы граничные условия, запрещающие их перемещения в