

УЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ РАСЧЕТЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ

Використання методу кінцевих елементів для розв'язання задачі фільтрації метану у газовміщуючому вуглепородному масиві у зоні впливу очисної виробки.

THE ACCOUNT STRESSEDLY-DEFORMED STATE OF COAL-ROCK MASSIF AT CALCULATION OF THE GAS FILTRATION IN THE ZONE OF COAL FACE INFLUENCE.

Application of a method of finite elements for the decision of methane filtration task in coal-rock massif in the zone of coal face influence.

Проблема выделения метана при разработке угольных месторождений с каждым годом становится все актуальней. Она связана как с безопасностью ведения горных работ, так и с возможностью использования метана в качестве сырья для энергетической промышленности, особенно в условиях нынешнего топливного кризиса.

Фильтрация газа – это сложный физический процесс, требующий детального и всестороннего изучения. На его протекание оказывает влияние множество факторов. Это и природные, геологические особенности формирования угольных и породных метаноносных пластов, а также систем пор, трещин и других нарушений в этих пластах, и глубина разработки, и технологические параметры процессов выемки угля.

Нетронутый углепородный массив находится в состоянии равновесия с установившимся начальным полем напряжений. Нет сомнений, что явление фильтрации инициируется проведением горных выработок с возникающим, как следствие, дополнительным полем напряжений. Под его действием начинается выход и движение газа. Поэтому для решения задачи о фильтрации метана, как нам представляется, сначала необходимо получить решение задачи о напряженно-деформированном состоянии горного массива в зоне влияния очистной выработки.

Для определения распределения поля напряжений в зоне влияния очистной выработки будем использовать численные методы.

Наиболее универсальным численным методом решения геомеханических задач является метод конечных элементов, который позволяет учитывать форму поперечного сечения горных выработок, сложные граничные условия и разнообразные свойства геоматериалов. Суть данного метода состоит в минимизации полной потенциальной энергии, выраженной через конечное число узловых параметров, что приводит к замене системы дифференциальных уравнений системой обыкновенных алгебраических уравнений.

Все внешние и внутренние силы, граничные и начальные условия приводятся к узлам. Отсутствие перемещений в каком-либо направлении учитывается заданием жестких связей.

Построение упруго-пластической модели осуществляется при помощи постепенного усложнения ее математического аппарата. На первом этапе осуществляется решение в рамках теории упругости. При этом упругое решение принимается в качестве первого приближения. Окончательное решение находится путем последовательной корректировки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зависимости от заданных нелинейных характеристик его деформирования.

Для оценки режима разрушения горных пород вблизи выработки и оценки ее устойчивости наиболее информативным показателем является отношение разности наибольших (σ_1) и наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям, вызванным весом вышележащей толщи горных пород. Оно характеризует возможность возникновения разрушения:

$$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma h},$$

где h – высота вышележащей толщи горных пород; γ - ее удельный вес.

Примем следующие начальные условия: слоистая изотропная среда (уголь, песчаник, аргиллит, алевролит), размер исследуемой области – 300 x 150 x 50 м, длина лавы – 200м; мощность пласта – 2 м; глубина H – 1200м. В результате получим поле распределения параметра Q , которое представлено на рис. 1.

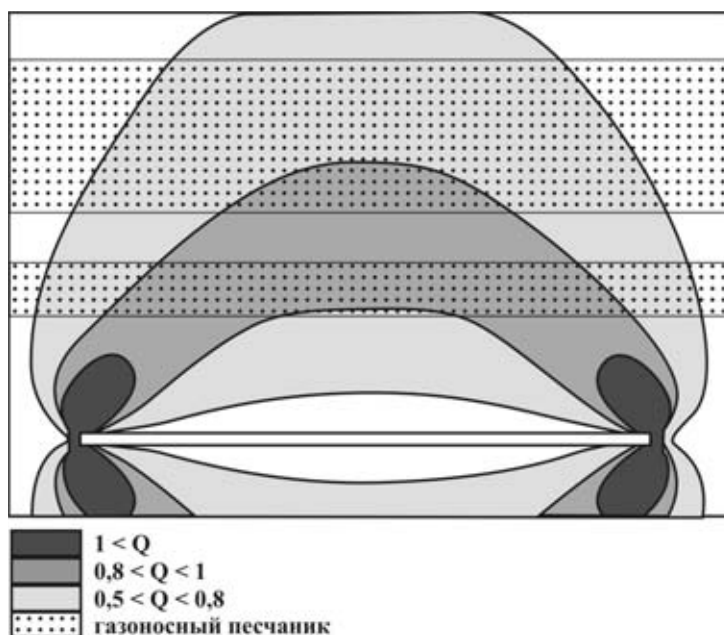


Рис. 1 - Распределение параметра Q

При различных испытаниях образцов горных пород на одноосное сжатие [1] было показано, что процесс трещинообразования начинается при достижении

предела упругости $\sigma^{упр}$ (рис. 2).

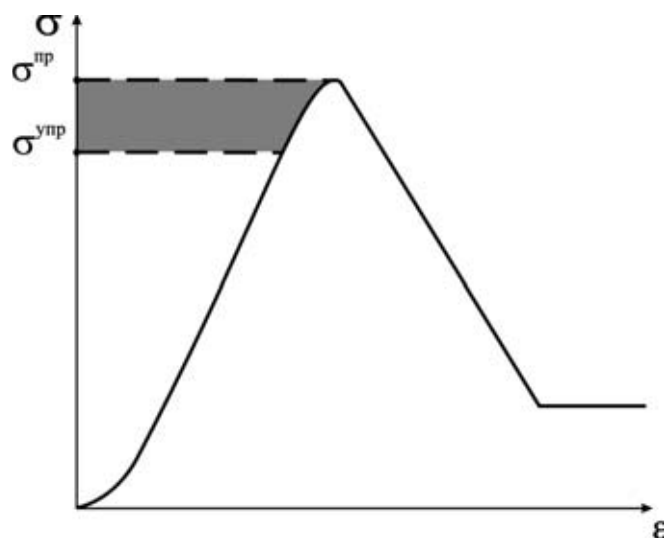


Рис. 2 - Диаграмма напряжение-деформация испытания образцов горных пород на одноосное сжатие

Затем, при увеличении нагрузки, увеличивается и трещиноватость образца. При достижении предела прочности породы - $\sigma^{пр}$, на стадии разупрочнения, трещинообразование практически прекращается.

Авторами [2] были проведены экспериментальные исследования зависимости фильтрационных свойств различных горных пород от напряженного состояния образца. Ими было доказано, что в области упругих деформаций трехосное сжатие приводит к закрытию микротрещин и пор, и фильтрация мало изменяется. За пределами упругости и до предела прочности, что соответствует областям начала трещинообразования и интенсивного трещинообразования, происходит рост коэффициента проницаемости на 40 – 400% в различных горных породах. Дальнейший рост коэффициента проницаемости за пределом прочности незначителен и происходит только за счет расширения существующих трещин.

Кроме этого, в результате лабораторных и шахтных исследований, проведенных сотрудниками ИГТМ НАНУ [3], было установлено, что газовая проницаемость горных пород при прочих равных условиях минимальна в равнокомпонентном поле сжимающих напряжений и закономерно возрастает с увеличением разнокомпонентности внешней нагрузки.

Учитывая вышеизложенное, примем следующий критерий трещинообразования:

$$\sigma^{упр} < \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma^{пр} .$$

В соответствии с этим и при условии, что зависимость $k_{II} = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ имеет линейный характер, схема расчета коэффициента проницаемости примет

вид:

$$k_{II} = \begin{cases} 0, & \text{при } \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma^{ynp}; \\ f(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{k_{\max}}{\sigma^{nl} - \sigma^{ynp}} (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma^{ynp}), & \text{при } \sigma^{ynp} < \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma^{np}; \\ k_{\max}, & \text{при } \sigma_1 - \sigma_3 > \sigma^{np}; \end{cases}$$

Будем считать, что область, в которой существует фильтрационная способность, совпадает с областью, где показатель $Q > 0,5$, что соответствует напряжениям, вызывающим начало процесса трещинообразования в массиве. За границами этой области фильтрационная способность отсутствует, коэффициент проницаемости равен нулю, а давление свободного газа, содержащегося в изолированных порах, близко к местному горному давлению.

Фильтрацией называют движение газа под действием давления, создаваемого в трещиноватой среде внешними нагрузками. Будем исследовать движение газа в неоднородной, трещиновато-пористой слоистой среде.

Квазигармоническое уравнение неоднородной фильтрации газа можно записать в следующем виде [4]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0,$$

где p – искомая функция распределения давления газа; k_x, k_y – коэффициенты проницаемости горного массива.

Давление метана на границе области фильтрации, ограниченной кривой АОВ, равно местному гидростатическому горному давлению:

$$p_0 = \gamma h.$$

Разобьем исследуемую область (см. рис.1) на N треугольных конечных элементов с узлами $x_i, y_i, x_j, y_j, x_k, y_k$, где i, j, k изменяются в пределах от 0 до N и будем считать, что давление p метана в узлах i, j, k аппроксимируется линейной функцией:

$$p = a_1 + a_2 x + a_3 y. \quad (1)$$

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 N_i, N_j, N_k . С их помощью давление p в произвольной точке выражается следующим образом:

$$p = N_i p_i + N_j p_j + N_k p_k, \quad (2)$$

Градиенты давления определяются при дифференцировании выражения (2):

$$\{I\} = [B]\{p\}.$$

Скорости фильтрации v_x, v_y при $k_x = k_y = k$ равны:

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = k \{I\} = k [B]\{p\}, \quad (3)$$

где

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b_i}{2\Delta} & \frac{b_j}{2\Delta} & \frac{b_k}{2\Delta} \\ \frac{c_i}{2\Delta} & \frac{c_j}{2\Delta} & \frac{c_k}{2\Delta} \end{bmatrix};$$

$$2\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix};$$

$$b_i = y_j - y_k;$$

$$c_i = x_k - x_j.$$

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 [5, 6].

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

$$A_K = \{Q\}^T \{\partial p\}. \quad (4)$$

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

$$A_{BH} = \int_S (v_x dI_x + v_y dI_y) dS = \int_S \{dI\}^T \{v\} dS. \quad (5)$$

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

Из выражений (4) и (5) получим:

$$\{Q\} = k_\phi \int_S \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [B]^T [B] \{H\} dS = [K] \{H\}, \quad (6)$$

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

$$[K] = \begin{bmatrix} -(a+b) & a & b \\ a & -(a+c) & c \\ b & c & -(b+c) \end{bmatrix};$$

$$a = \Delta k_\phi [(y_k - y_i)(y_j - y_k) + (x_i - x_k)(x_k - x_j)];$$

$$b = \Delta k_\phi [(y_j - y_k)(y_i - y_j) + (x_k - x_j)(x_j - x_i)];$$

$$c = \Delta k_\phi [(y_i - y_j)(y_k - y_i) + (x_j - x_i)(x_i - x_k)];$$

Критерий непроницаемости границ области фильтрации можно записать в следующем виде [7]:

$$\frac{dp}{dx} l_x + \frac{dp}{dy} l_y = 0, \quad (7)$$

где l_x и l_y - направляющие косинусы нормали к границе области фильтрации.

Если точки i и j граничного конечного элемента принадлежат границе, то

$$\begin{cases} l_x = \frac{y_j - y_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}; \\ l_y = \frac{x_j - x_i}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}. \end{cases}$$

Учитывая, что

$$\begin{cases} v_x = -k_{II} \frac{dp}{dx}; \\ v_y = -k_{II} \frac{dp}{dy}; \end{cases}$$

выражение (7) перепишется в виде:

$$v_x l_x + v_y l_y = 0. \quad (8)$$

Из выражений (3) и (8) можно найти значение давления p_k в точке граничного элемента k , не принадлежащей границе области фильтрации.

$$p_k = -\frac{(b_i + b_j)l_x + (c_i + c_j)l_y}{b_k l_x + c_k l_y} p_0,$$

где p_0 – граничное значение давления.

При этом значении давления p_k составляющая градиента скорости фильтрации, перпендикулярная границе, будет равна нулю.

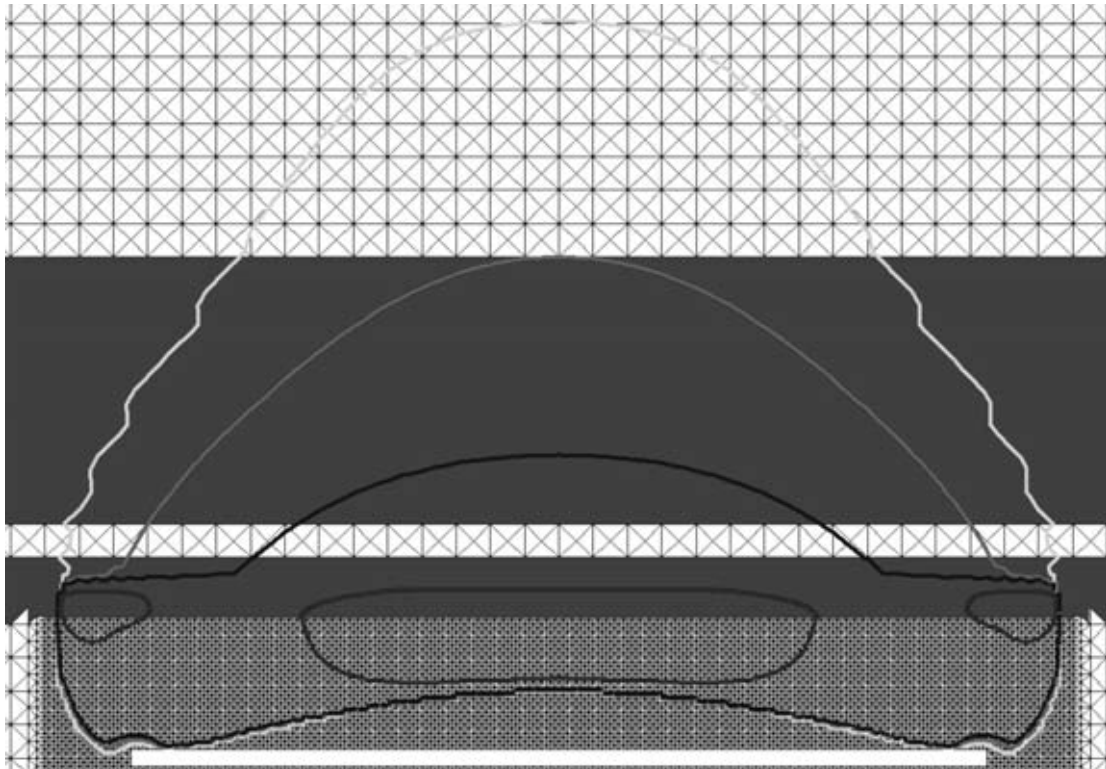
Примем, что в кровле на расстоянии 17 и 30 м от разрабатываемого угольного пласта расположены два пласта песчаника мощностью 7 и 30 м соответственно, газоносностью $7 \text{ м}^3/\text{т}$, проницаемостью $k_{\max} = 0,2$ мДа. Пусть область начала микрорастрескивания соответствует зоне, где $0,5 < Q < 0,8$, а область интенсивного трещинообразования – $0,8 < Q < 1$.

Сделаем расчеты, используя пакет программ, написанных авторами на языке Fortran, для математических расчетов и Visual Basic для графического представления полученных данных.

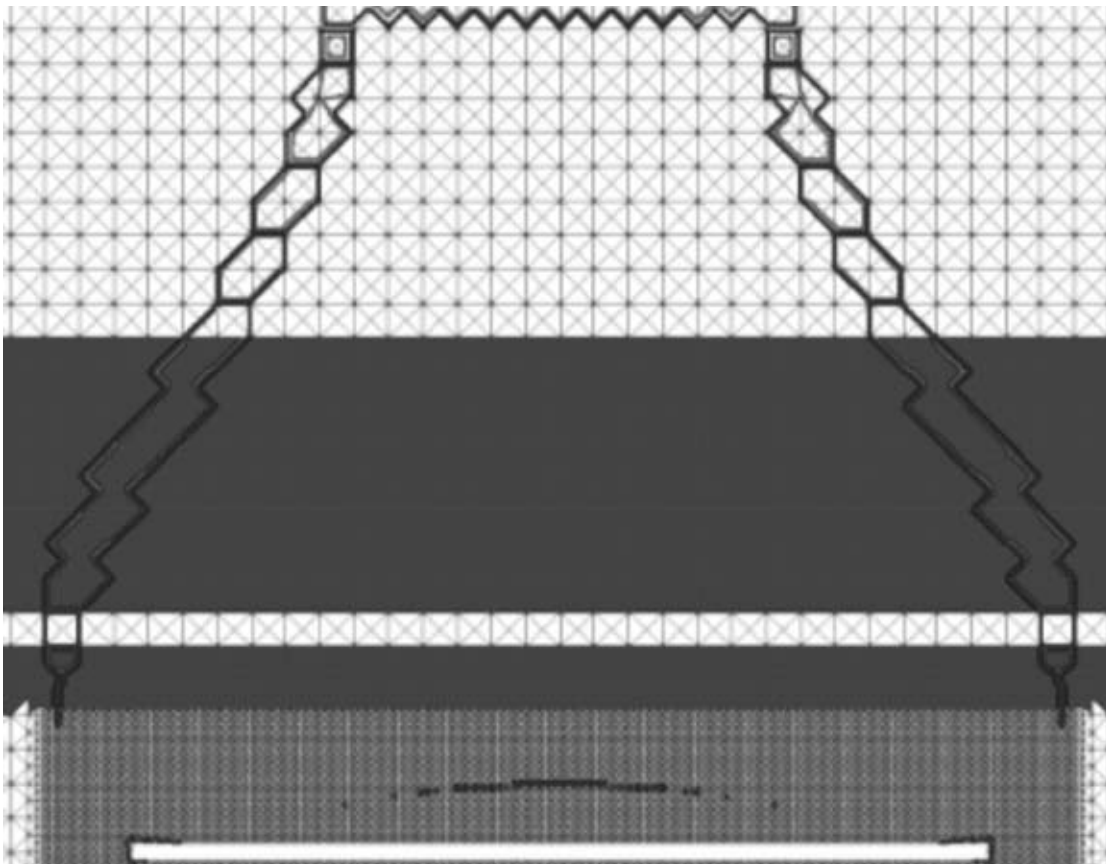
На рисунке 3 показано распределение относительных давлений метана $p=p/p_0$. Сплошным серым цветом показаны слои газоносного песчаника.

Как видно из рис. 3-5, метан из газоносных песчаников кровли с наибольшей скоростью будет выделяться по контуру свода обрушения в очистной забой. Кроме этого, постепенно, с малой скоростью, газ будет концентрироваться у границ области фильтрации, в кровле выработки, образуя там зоны скопления метана.

Таким образом, зная положение этих зон, можно определять параметры бурения дегазационных скважин позади очистного забоя. Из рис. 4 и 5 видно, что угол их наклона к плоскости разрабатываемого пласта должен быть достаточно большим, т.к. газ будет скапливаться не в своде обрушения, откуда он быстро выйдет в атмосферу выработки, а выше, на границе области фильтрации.



Изолинии соответствуют уровню относительного давления 1,2; 2,0; 2,7; 20.
Рис. 3 - Распределение давления метана



Изолинии соответствуют уровню расходов, равному 0,01; 0,05; 0,1; 1,5 м³/сут.
Рис. 4 - Распределение расходов метана

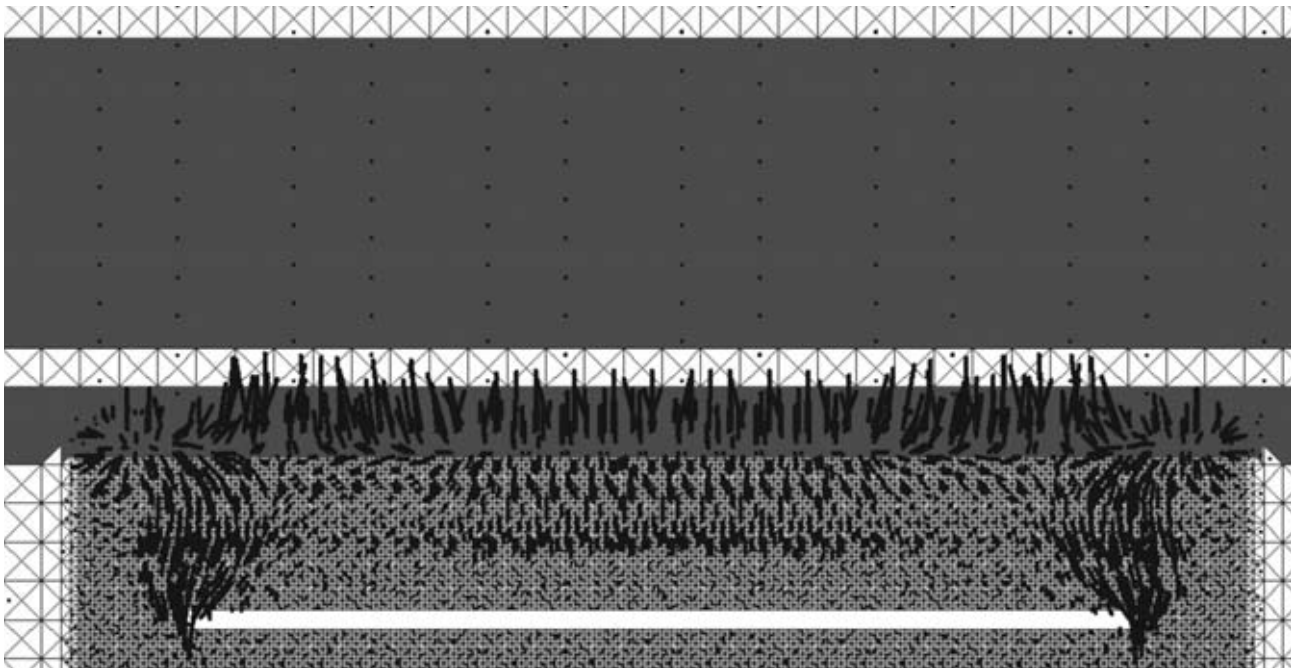


Рис. 5 - Поле скоростей движения метана

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев. Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. Ставрогин А.Н., Протосеня. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М. Недра, 1985. – 272 с.
3. Кулинич В.С., Кулинич С.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на газоотдачу метаносных горных пород. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 152-156.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
5. Амосин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М. Недра, 1975. – 144 с.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. Мир, 1979. – 392 с.