

ФИЛЬТРАЦИЯ МЕТАНА В СЛОИСТОМ МАССИВЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

З урахуванням впливу виду напруженого стану на коефіцієнт проникності за допомогою методу кінцевих елементів розв'язана задача фільтрації метану в зоні впливу очисної виробки. Наведені розподіли тиску, поля швидкостей руху метану та зони його концентрації.

FILTERING OF METHANE IN THE LAMINATED ROCK MASSIF AT DIFFERENT STRESS ASPECTS

Application of a method of final elements for the decision of methane filtration task in coal-rock massif in the zone of coal face influence. Effect of stress aspect on a coefficient of transparency is taken into account. Distributions of pressure, field of methane driving speeds and zone of its concentration are resulted.

Нетронутый углепородный массив находится в состоянии равновесия с установившимся начальным полем напряжений. Явление фильтрации инициируется проведением горных выработок с возникающим, как следствие, дополнительным полем напряжений. Под его действием начинается выход метана из газосодержащих пород и его движение. От величины и направления составляющих тензора напряжений зависит коэффициент проницаемости, характеризующий пропускную способность нарушенного горного массива. В различных областях – растяжения или сжатия, гидростатического или разнокомпонентного поля напряжений, в зонах упругих, пластических деформаций, разрушения – он будет иметь разные значения. Поэтому для решения задачи о фильтрации метана сначала необходимо изучить напряженно-деформированное состояние горного массива в зоне влияния очистной выработки.

Напряженное состояние элемента горной породы характеризуется величинами главных нормальных напряжений, причем их значения находятся в следующем соотношении:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (1)$$

Для прогноза и оценки режима разрушения горных пород вблизи выработки, оценки ее устойчивости и определения коэффициентов их проницаемости при решении задачи о фильтрации газа информативными показателями являются:

- отношение разности наибольших (σ_1) и наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям от веса вышележащей толщи горных пород, характеризующее возможность возникновения разрушения

$$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}, \quad (2)$$

где γ – плотность вышележащих слоев пород, H – глубина расположения выработки;

- отношение наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям от веса вышележащей толщи горных пород, характеризующее возможный режим разрушения:

$$P = \frac{\sigma_3}{\gamma H}. \quad (3)$$

Для оценки состояния, в котором находятся горные породы, в механике горных пород применяется также параметр Лоде-Надаи, вычисляемый по формуле:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (4)$$

Для напряженного состояния (1) значение его меняется в следующих пределах:

$$-1 \leq \mu_\sigma \leq 1 \quad (5)$$

и он характеризует вид напряженного состояния. Изменяясь в таком диапазоне, он охватывает все виды напряженного состояния. Так, при $\mu_\sigma = -1$ реализуется обобщенное растяжение, при $\mu_\sigma = 0$ – обобщенный сдвиг, а при $\mu_\sigma = 1$ – обобщенное сжатие. В глубине горного массива, не подверженного влиянию горных работ, горные породы находятся в состоянии обобщенного сжатия, а на контуре выработки в состоянии обобщенного растяжения, минимальная компонента главных напряжений при этом равна нулю. Изменение компонент напряжений и деформаций при удалении от контура выработки в глубь массива происходит непрерывно. При этом и величина μ_σ также меняется непрерывно от -1 до 1. Таким образом, состояние горных пород при удалении от контура выработки меняется от обобщенного растяжения к обобщенному сдвигу и далее к обобщенному сжатию.

Рассмотрим этот переход более детально на примере очистного забоя длиной 200 м, проведенного в слоистом горном массиве (рис. 1). Мощность разрабатываемого угольного пласта – 2 м, глубина разработки – 1200 м. Мощность первого газоносного песчаника – 8 м, высота над угольным пластом – 17 м, второго – 30 м и 30 м соответственно, их природная газоносность – 7 м³/т. Свойства основных пород – аргиллита и песчаника, – используемые при расчетах, приведены в таблице:

Таблица 1 – Свойства пород

Порода	Модуль упругости, E , мПа	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, C , мПа	Угол внутреннего трения, φ , °	Прочность на растяж., σ_p , мПа
Песчаник	10^5	0,2	10	30	-4
Аргиллит	10^4	0,2	5	30	-2



Рис. 1 – Схема расположения очистной выработки

После проведения расчетов, выполненных методом конечных элементов, получим следующее распределение параметров Q , P и μ_σ (рис. 2 - 4):

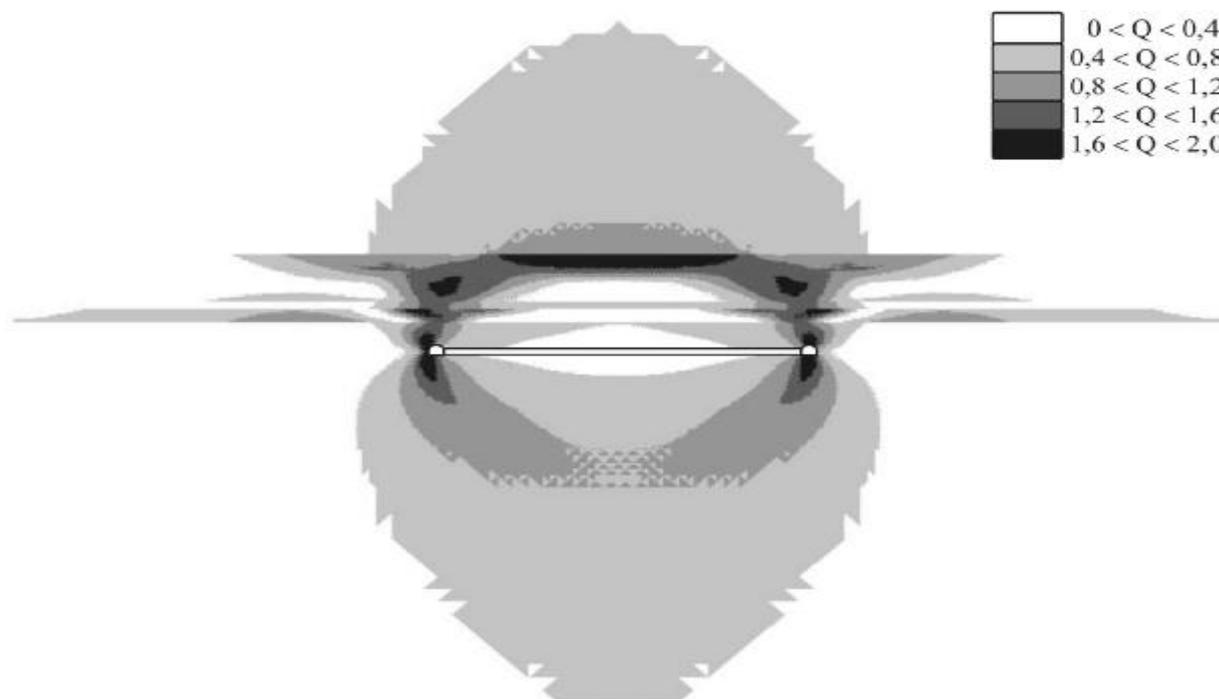


Рис. 2 – Распределение параметра Q

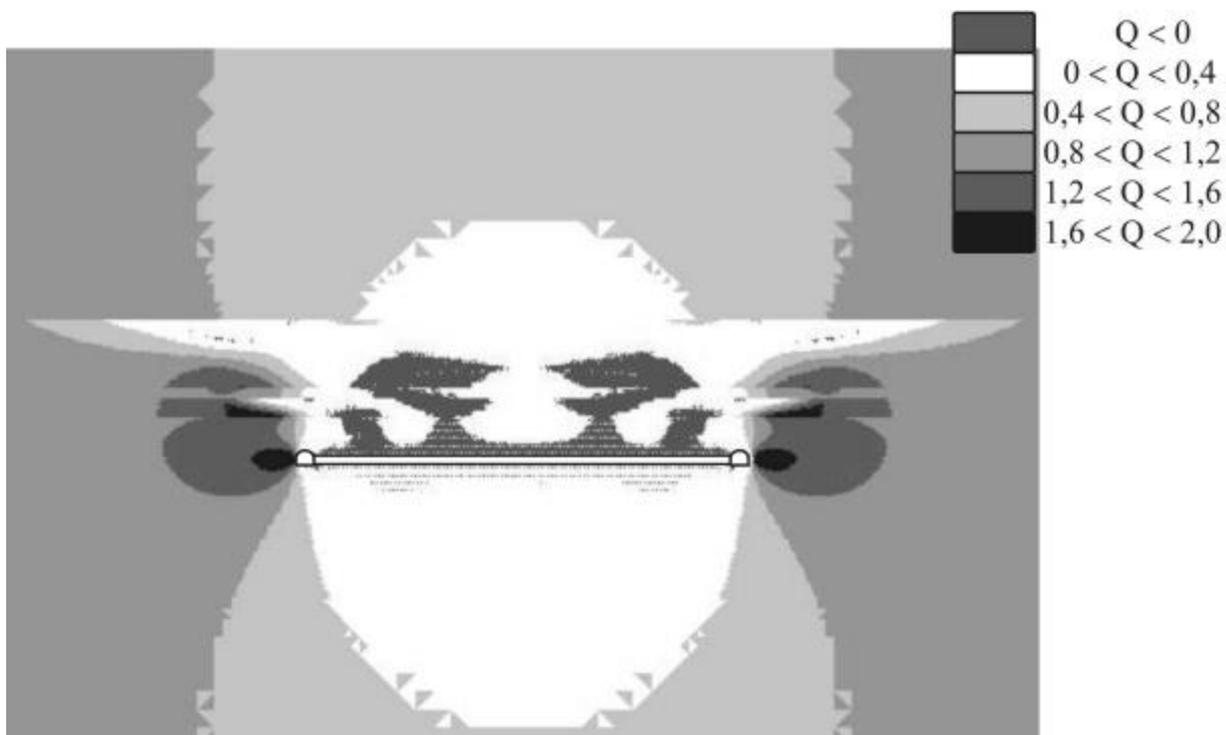


Рис. 3 – Распределение параметра P



Рис. 4 – Распределение параметра μ_{σ}

Как же связана величина коэффициента проницаемости с параметрами, характеризующими напряженное состояние горного массива вокруг очистной выработки?

В газоносных слоях углепородного массива, не нарушенного проведением горных выработок, параметр $0 < Q < 0,4$, а параметр μ_σ близок к единице (рис. 1, 3). Газ здесь содержится в изолированных порах [1, 2, 3], фильтрационная способность отсутствует, коэффициент проницаемости практически равен нулю (может доходить до $k_n = (0,45 - 16) * 10^{-6}$ мДа [4]), а давление свободного газа, содержащегося в изолированных порах, близко к местному горному давлению [2, 3].

В области упругих деформаций ($0,4 < Q < 0,5$; $-0,5 < \mu_\sigma < 0,5$) происходит закрытие микротрещин и пор [5], и фильтрационные свойства среды мало изменяются. Можно считать, что эта зона также не принадлежит области фильтрации.

Уплотнение породы и перекрытие трещинно-поровых каналов происходит и в области гидростатического сжатия, где $\mu_\sigma \approx 1$ и $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Как показано в работах [4, 6], при изменении нагрузки от 0 до 60 мПа, коэффициент проницаемости исследуемых образцов снижался по экспоненциальной зависимости от 0,14-0,25 мДа до 0-0,01 мДа.

За пределами упругости и до предела прочности, при разнокомпонентном нагружении, что соответствует областям начала трещинообразования ($0,5 < Q < 0,8$) и интенсивного трещинообразования ($0,8 < Q < 1$, рис. 2), происходит рост коэффициента проницаемости на 2-3 порядка в различных горных породах, который достигает значений $(0,4 - 2) * 10^{-2}$ мДа. Пропускная способность существующих и вновь образованных фильтрационных каналов в этой зоне возрастает с увеличением разнокомпонентности нагрузки [4-6]. На рис. 5 приводится зависимость коэффициента проницаемости от разности максимальной и минимальной компонент тензора напряжения.

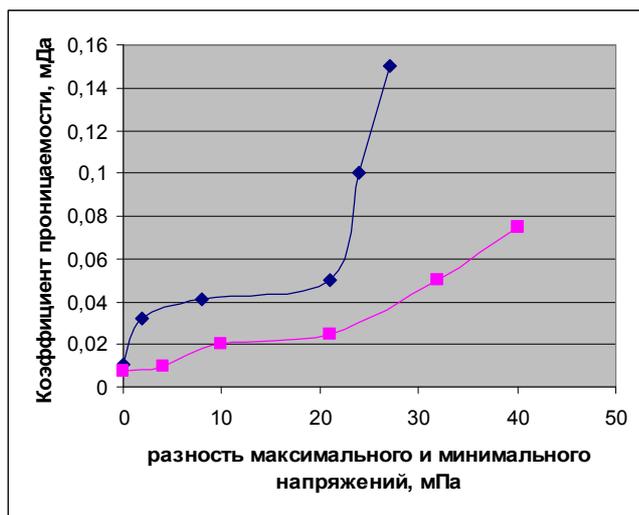


Рис. 5 – Зависимость коэффициента проницаемости от параметра Q

Дальнейший рост коэффициента проницаемости за пределом прочности происходит только за счет расширения существующих трещин. В области об-

рушения, которая характеризуется параметром $P \approx 0$, коэффициент проницаемости достигает максимальных значений.

Решим задачу о фильтрации метана в окрестности очистной выработки при наличии в кровле выработки двух пластов газоносного песчаника методом конечных элементов [7]. Все вышеизложенные положения были учтены при расчетах области фильтрации и коэффициентов проницаемости. В результате были получены поля коэффициентов проницаемости (рис. 6), распределения давления газа (рис. 7), скоростей его движения (рис. 8) и расходов метана (рис. 9а и 9б).

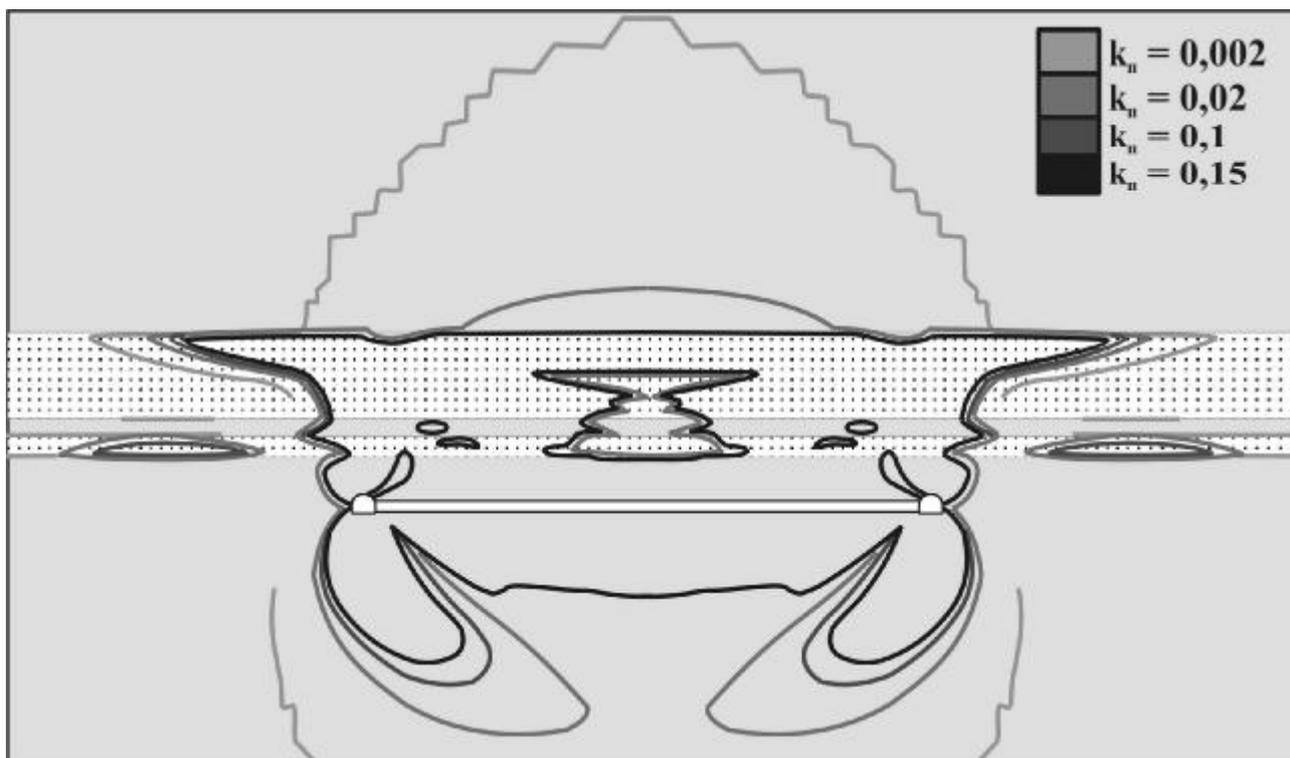


Рис. 6 – Поле коэффициентов проницаемости

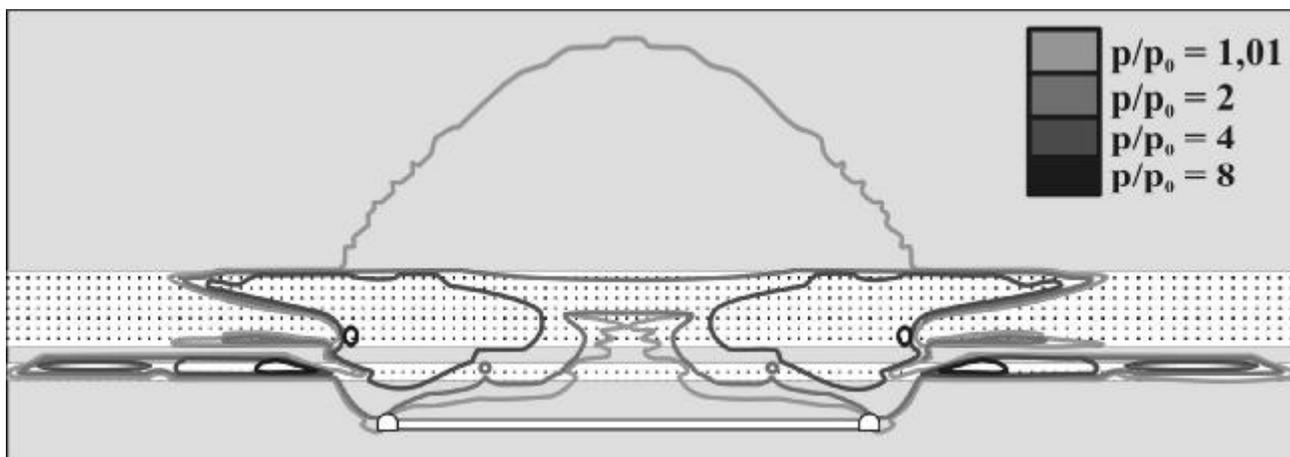


Рис. 7 – Давление метана

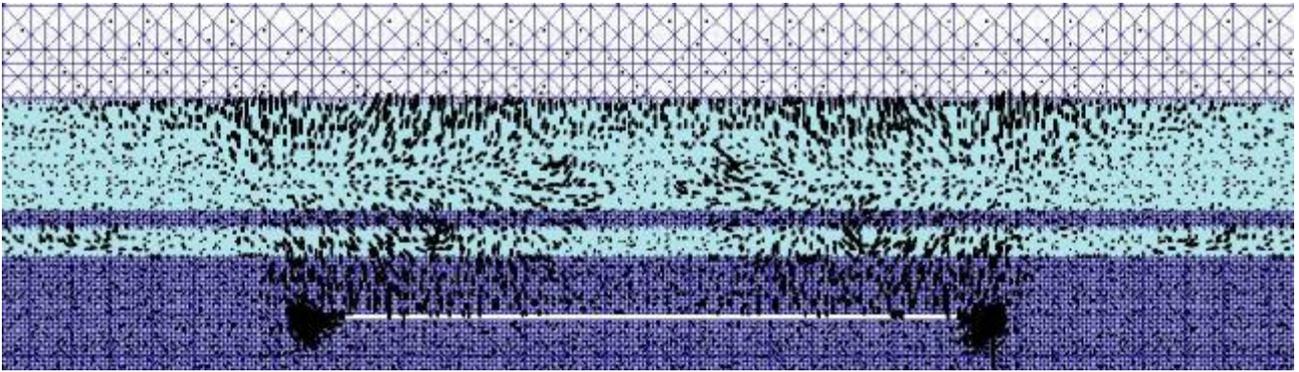


Рис. 8 – Поле скоростей движения метана

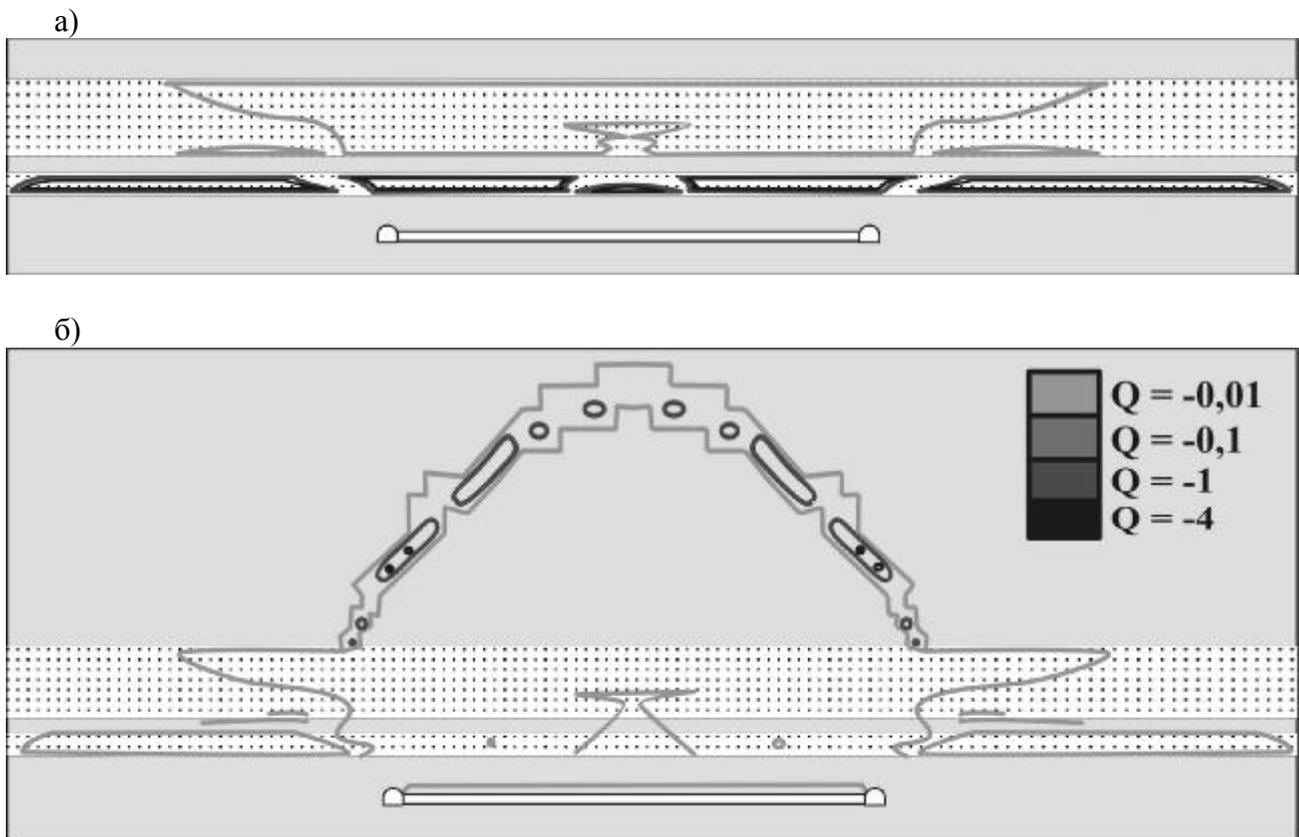


Рис. 9 – Расход метана: а) - положительный; б) - отрицательный

Как видно из рис. 6, поле коэффициентов проницаемости массива полностью определяется геомеханическими зонами, определяемыми параметрами Q , P и μ_{σ} .

Давление метана в слоях песчаника в несколько раз превышает начальное поровое давление (рис. 7) за счет освобождения метана в результате десорбции, сопровождающей процесс микрорастрескивания горного массива. Это обеспечивает градиент давления, необходимый для начала процесса фильтрации газа из газосодержащих слоев песчаника в очистной забой, атмосферное давление в котором составляет всего 0,1 мПа.

Области положительного расхода метана – области, из которых происходит его выход, показаны на рис. 9а. Отрицательный расход (рис. 9б) показывает места возможного скопления метана.

Из рисунков 8 и 9б также видно, что 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 техногенные зоны скопления метана (области, ограниченные более темными кривыми). Это подтверждает теорию о «быстром» и «медленном» газе, выдвинутую доктором геолого-минералогических наук Лукиновым В.В. [8]. В ней говорится, что наибольший приток газа в лаву будет осуществляться за счёт его быстрого выделения из разрушенных, разрыхленных и расчленённых на блоки пород. Верхняя же часть области фильтрации является зоной аккумуляции газа, и её формирование по времени происходит позже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1999, №5. – С. 13-18.
2. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №3. – С. 3-23.
3. Кареев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №6. – С. 47-55.
4. 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.
5. Ставрогин А.Н., Протосеня. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 272 с.
6. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Курносоев С.А., Иванчишин С.Я и др. Газовая проницаемость горных пород в разнокомпонентном поле сжимающих напряжений. – В сб.: Геотехническая механика, № 42. – Днепропетровск, 2003. – С. 18-24.
7. Круковский А.П., Круковская В.В. Фильтрация газа в зоне влияния очистной выработки с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 49. – Днепропетровск, 2004. – С. 23-29.
8. Лукинов В.В., Клец А.П., Ильюшенко В.Г. и др. Методика расчета извлекаемых запасов метана из подработанного и надработанного углепородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 37. – Днепропетровск, 2002. – С. 62-69.