

УДК 622.831.332:551.24

В.В. Круковская<sup>1</sup>, А.Н. Молчанов<sup>2</sup>

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ДЕСОРБЦИОННО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАРУШЕННОЙ ЗОНЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

<sup>2</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины

*С использованием методов численного моделирования установлены закономерности протекания нестационарных десорбционно-фильтрационных процессов в угольном пласте в забое горной выработки при переходе из ненарушенной зоны угольного пласта к тектонически нарушенной зоне. Приведены графики изменения проницаемости угольного пласта, расхода метана и начальной скорости газовой выделенности в ненарушенной зоне угольного пласта и на переходном участке, окружающем выбросоопасную зону. Показано, что на переходном участке десорбционно-фильтрационные процессы, вызванные продвижением забоя, затухают гораздо медленнее, чем в ненарушенной зоне, начальная скорость газовой выделенности в контрольный шпур постепенно повышается.*

**Ключевые слова:** фильтрация и десорбция метана, тектонически нарушенная зона угольного пласта, численное моделирование.

### Введение

Для Донбасса характерно развитие разнообразных форм геологических структур. В крупных синклиналиных складках сосредоточено большинство шахт Донбасса. Осложняют условия эксплуатации месторождений размывы и замещения угольных пластов, микроскладчатость [1]. В результате внутрислоевых движений угольные пласты становятся рыхлыми, бесструктурными, иногда приобретают многопачечное строение. Такие участки опасны по внезапным выбросам угля и газа [2]. Для своевременного прогнозирования опасности возникновения газодинамических явлений необходимо исследование изменений течения десорбционно-фильтрационных процессов при подходе к нарушенной зоне.

Цель работы – с использованием методов математического моделирования установить закономерности протекания нестационарных десорбционно-фильтрационных процессов при переходе из ненарушенной зоны угольного пласта к тектонически нарушенной зоне.

Постановка задачи

Уравнения неразрывности газового потока [3, 4] в плоской постановке при наличии источника газовой выделению можно представить в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t).$$

где  $p$  – давление газа, МПа;  $k_x, k_y$  – коэффициенты проницаемости твердого тела, мДа;  $q(t)$  – функция газовой выделению.

В окрестности тектонических нарушений уголь перемят, на 10-20 м по обе стороны от нарушения имеет начальную проницаемость. В результате проведения горной выработки перераспределяется поле начальных напряжений, во вмещающем массиве формируются системы трещин. На поле начальной, тектонической, проницаемости  $K_{\text{тект}}$  накладывается поле технологической проницаемости  $K_{\text{техн}}$  [5, 6], которая зависит от компонент тензора главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ :  $K = K_{\text{техн}}(x, y) + K_{\text{тект}}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ .

Таким образом, для определения  $K_{\text{техн}}$  необходимо выполнить расчет поля напряжений, и полная система уравнений, описывающая нестационарное поведение двухфазной среды «трещиновато-пористое твердое тело – газ» в тектонически нарушенной зоне, будет выглядеть следующим образом [5, 7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) &= \rho_s \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right); \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t); \\ k &= k_{\text{техн}} + k_{\text{тект}}. \end{aligned}$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ , МПа/м;  $X_i(t)$  – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м<sup>3</sup>;  $T_i(t)$  – проекции сил, вызванных внутренним трением, действующих на единицу объема тела, Н/м<sup>3</sup>;  $P_i(t)$  – проекции сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве, Н/м<sup>3</sup>,  $P_i = \partial p / \partial x_i$  [8];  $p$  – давление газа, МПа;  $\rho_s$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;  $u_i$  – перемещения, м.

Силы  $T_i(t)$  пропорциональны скорости изменения перемещений:

$$T_i(t) = -c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i,$$

где  $c_g$  – коэффициент демпфирования, кг/(с·м<sup>3</sup>).

Для анализа напряженно-деформированного состояния породного массива в работе используются геомеханические параметры, характеризующие разнокомпонентность поля напряжений и степень разгрузки массива от горного давления:

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}, \quad P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H}$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений, МПа;  $\gamma$  – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина разработки, м.

$k_{техн}$  будем определять из соотношений [9]:

$$\begin{cases} k = 0 \text{ при } Q^* < 0,6; \\ k = 0 \text{ при } Q^* < 0,7; P^* > 0,25; \\ k = k_{\min} \text{ при } 0,7 < Q^* < 0,8; \\ k = e^{0,26Q^* - 4,65} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* > 0,1; \\ k = k_{\max} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* < 0,1. \end{cases}$$

Начальные и граничные условия для поставленной задачи записываются в виде:

$$\begin{array}{ll} & p|_{\Omega_1(t)} = p_0; \\ \sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; & p|_{\Omega_2} = 0,1 \text{ МПа}; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; & k_{техн} = f(x, y); \\ p|_{t=0} = p_0. & u_x|_{\Omega_3} = 0; \\ & u_y|_{\Omega_4} = 0, \end{array}$$

где  $p_0$  – давление в момент времени  $t=0$ , МПа;  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура.

Рассмотрим случай, когда выработка подходит к сбросу с амплитудой 1 м, по угольному пласту мощностью 1,5 м, на глубине 1200 м. Газоносность угля – 20 м<sup>3</sup>/т, содержание метана в свободной форме – 10 %.

Свойства пород, используемые при расчетах, представлены в табл. 1.

Свойства пород

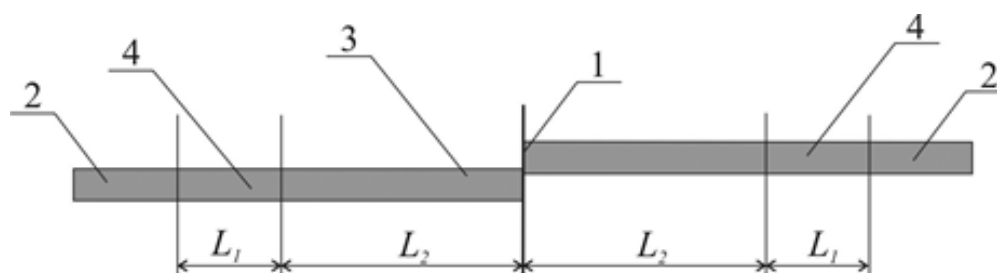
Порода	Модуль упругости, Е, МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Сцепление, С, МПа	Угол внутреннего трения, $\varphi$ , °	Прочность на растяжение, $\sigma_p$ , МПа
Аргиллит	$10^4$	0,2	3,5	30	2
Уголь	$5 \cdot 10^3$	0,2	1,75	30	1

Будем считать, что тектоническая проницаемость  $k_{\text{тект}}$  угольного пласта, сцепление угля  $C$ , прочность угля на растяжение  $\sigma_p$

- имеют постоянные значения  $k_{\text{тект}}^0$ ,  $C^0$  и  $\sigma_p^0$  в ненарушенной зоне 2, рис. 1;

- имеют постоянные значения  $k_{\text{тект}}^{\text{нз}}$ ,  $C^{\text{нз}}$  и  $\sigma_p^{\text{нз}}$  в нарушенной зоне 3 длиной  $L_2$  по обе стороны от сброса;

- на переходных участках 4 длиной  $L_1$  линейно изменяются от начальных значений до значений в нарушенной зоне.



**Рис. 1.** Схема расположения участков с различными физико-механическими и фильтрационными свойствами: 1 – тектоническое нарушение; 2 – ненарушенная зона угольного пласта; 3 – нарушенная зона угольного пласта; 4 – переходный участок;  $L_1$  – длина переходного участка;  $L_2$  – длина тектонически нарушенного участка

С помощью разработанной модели связанных процессов изменения НДС массива, десорбции и фильтрации метана исследуем особенности процесса фильтрации метана в нарушенной зоне вблизи тектонического нарушения.

### Сравнение фильтрационных параметров в ненарушенной зоне угольного пласта и на переходном участке вблизи тектонического нарушения

Проведем серию численных экспериментов с целью сравнить параметры фильтрации метана в ненарушенной зоне угольного пласта и на переходном

участке, окружающем выбросоопасную зону. Примем, что  $L_1 = 2$  м,  $L_2 = 10$  м, и рассмотрим, как изменяются проницаемость угольного пласта и параметры фильтрации метана в ненарушенной зоне угольного пласта (расстояние до переходного участка – 1,4 м, расстояние до тектонического нарушения – 13,4 м) и на переходном участке (расстояние до тектонического нарушения – 12,0 м). Значения фильтрационных параметров в узлах конечно-элементной сетки вдоль горизонтальной прямой  $a$ , проходящей по центру угольного пласта (рис. 2), показаны на рис. 3 и 4.

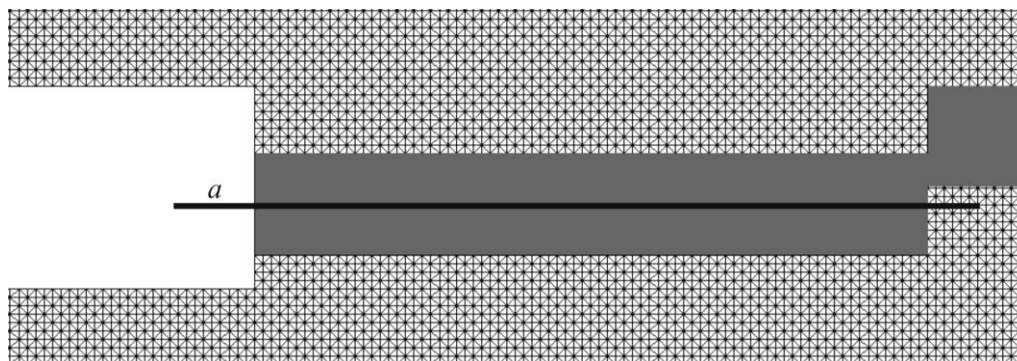


Рис. 2. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

На рис. 3 представлены результаты расчета коэффициентов проницаемости угольного пласта в зависимости от напряженного состояния углепородного массива на различных временных итерациях  $i$ ,  $i \in [1; 160]$ .

Фильтрационная проницаемость принимает самые большие значения в призабойной части угольного пласта, рис. 3, а, что обусловлено разгрузкой приконтурной области от горного давления. Разнокомпонентность поля напряжений (значение параметра  $Q$ ) в этой зоне достигает максимума, происходит процесс трещинообразования.

Со временем разгруженная зона с высокой проницаемостью подвигается вглубь массива, начиная с 80-й итерации этот процесс происходит менее интенсивно. На переходном участке, рис. 3, б в призабойной части угольного пласта расчетные значения коэффициентов проницаемости в 1,7-2,5 раза превышают значения коэффициентов проницаемости в ненарушенной области, рис. 3, а. Область фильтрации на переходном участке развивается более интенсивно.

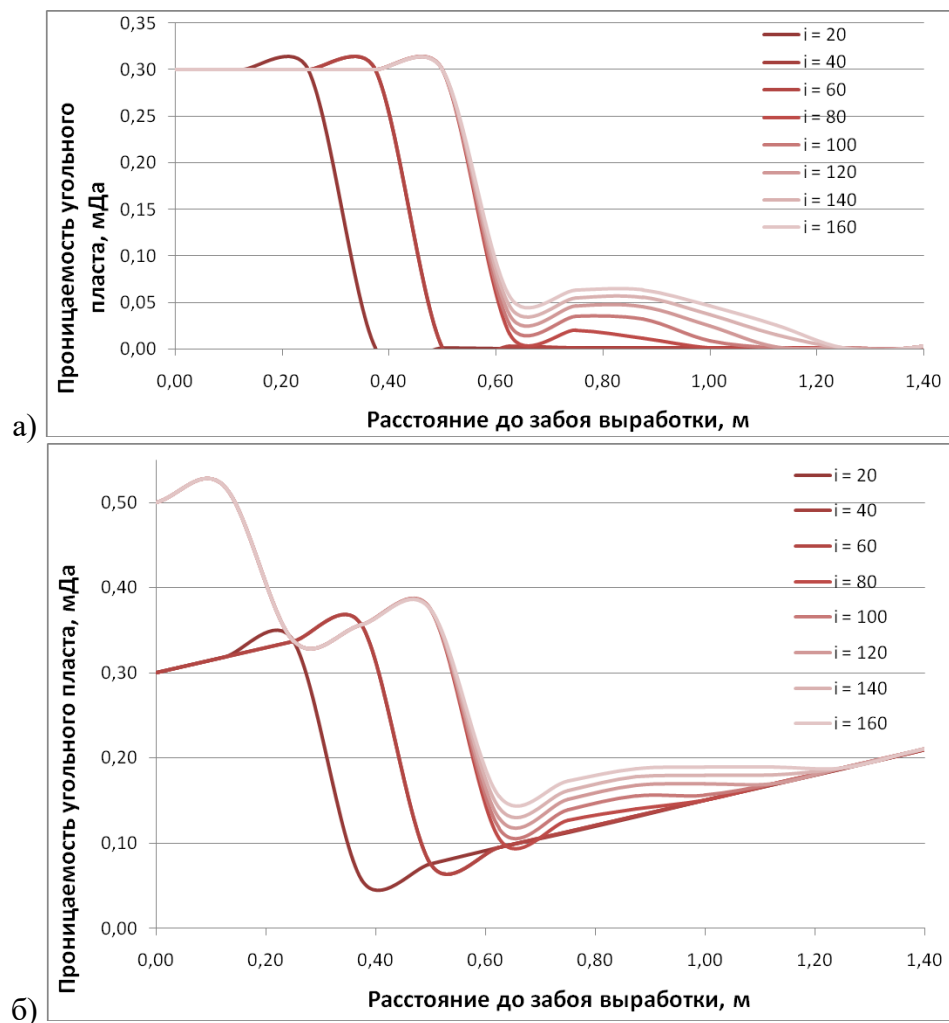
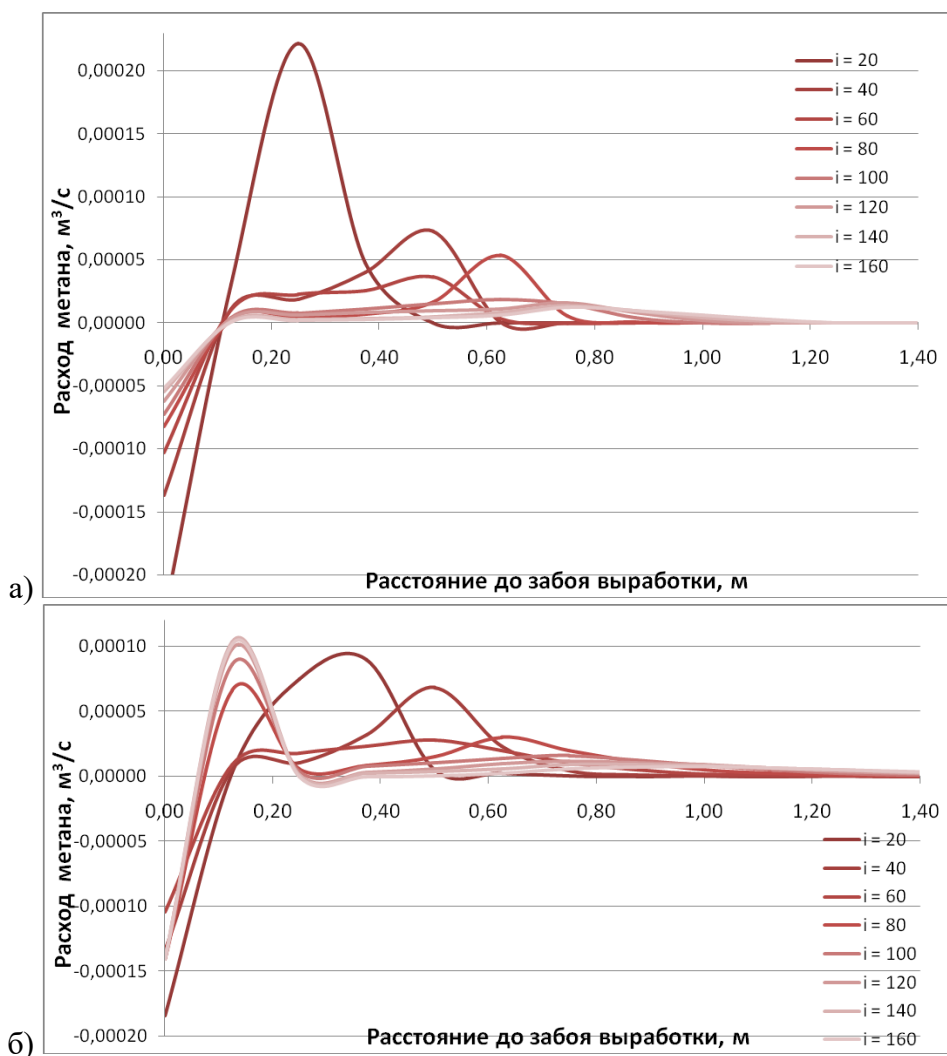


Рис. 3. Проницаемость угольного пласта в различные моменты времени: а) ненарушенный угольный пласт; б) переходный участок

На рис. 4 показаны графики изменения во времени метановыделения вдоль прямой  $a$ . Причем положительные значения расхода метана говорят о выделении (десорбции) метана в трещинно-поровое пространство угольного пласта, отрицательные – о газовыделении в атмосферу выработки.

Из рисунка видно, что, хотя в начальные моменты времени ( $i = 20$ ) метановыделение как в трещинно-поровое пространство, так и в выработку, в ненарушенной зоне и превышает метановыделение на переходном участке, но в дальнейшем этот процесс протекает совершенно по-разному в рассматриваемых двух случаях. В ненарушенной зоне угольного пласта за период времени до 160-й временной итерации расход метана в выработку снижается в 5 раз, а на переходном участке – всего в 1,3 раза. В ненарушенной зоне угольного пласта за этот же период времени десорбция метана в трещинно-поровое пространство снижается в 6 раз, а на переходном участке – в 1,3 раза.



**Рис. 4.** Расход метана в различные моменты времени: а) ненарушенный угольный пласт; б) переходный участок

Таким образом, процессы десорбции и выделения метана в атмосферу выработки в ненарушенном угольном пласте носят ярко выраженный затухающий характер, а на переходном участке – нет. Это хорошо видно на рис. 5, где показано изменение во времени газовыделения в выработку и суммарного количества десорбированного метана (вдоль прямой *a*) в обоих рассматриваемых случаях.

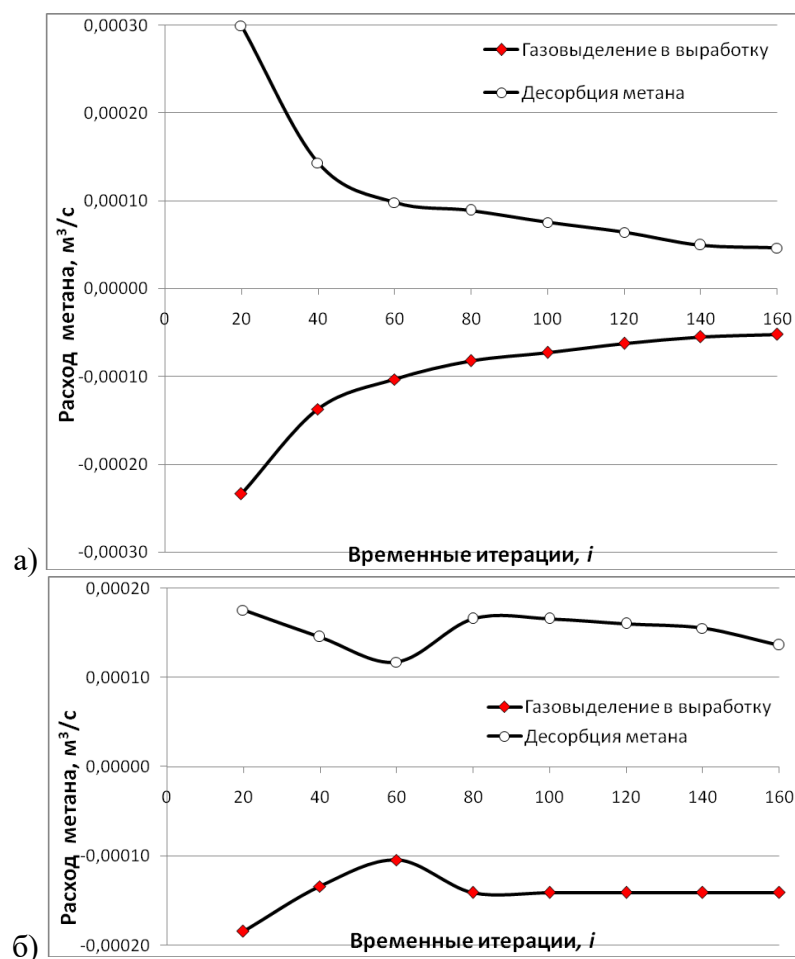


Рис. 5. Расход метана в различные моменты времени: а) ненарушенный угольный пласт; б) переходный участок

### Изменение начальной скорости газовыделения в ненарушенной зоне угольного пласта и на переходном участке вблизи тектонического нарушения

Согласно Правилам ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям [10], прогноз выбросоопасности угольных пластов осуществляется по начальной скорости газовыделения. Измерения начальной скорости газовыделения для текущего прогноза выбросоопасных зон в подготовительных и очистных выработках проводят в контрольных шпурах диаметром 42-43 мм в интервалах бурения 1,5 м; 2,5 м и 3,5 м при длине измерительной камеры 0,5 м. Шпуры для прогноза выбросоопасности бурят в подготовительных выработках через 2 м подвигания забоя; в очистных забоях – не более чем через 2,7 м их подвигания. Бурение шпуров осуществляют не менее чем за  $L=20$  м до нарушения при пересечении нарушения и при отходе от него не менее чем на 20 м. Начальная скорость газовыделения изме-



ряется не позднее, чем через 2 мин после окончания бурения интервала шпура.

Зона относится к опасной, если хотя бы в одном из интервалов шпура измеренная начальная скорость газовыделения  $g_n$  равна или больше критической  $g_n^0$ .

Выполним моделирование процесса фильтрации метана и его выделения в шпур, пробуренный в забое выработки, на переходном участке угольного пласта с целью определения закономерностей изменения параметров фильтрации. «Замерим» начальную скорость газовыделения в контрольный шпур длиной 3 м при длине измерительной камеры 0,5 м. Для этого просуммируем принадлежащие фильтрующей части контура скважины значения расхода метана.

Рассмотрим ненарушенный угольный пласт ( $L=20$  м) и переходный участок ( $L=14,5$  м и  $L=13$  м). На рис. 6 приведены кривые изменения во времени начальной скорости газовыделения в контрольный шпур при приближении забоя выработки к геологическому нарушению и пересечении переходного участка.

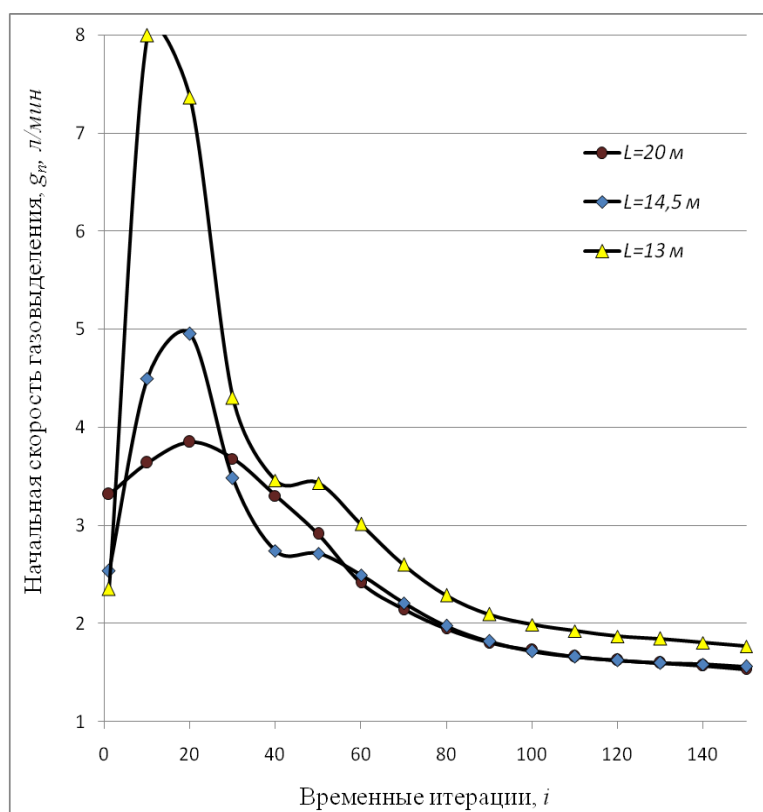


Рис. 6. Изменение начальной скорости газовыделения при сокращении расстояния  $L$  между забоем выработки и геологическим нарушением

Максимальные и средние скорости газовыделения в зависимости от расстояния  $L$  между забоем выработки и геологическим нарушением для интервала времени до 2 мин после окончания бурения шпура представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Максимальные и средние скорости газовыделения на интервале времени 2 мин после окончания бурения шпура**

Расстояние между забоем выработки и нарушением, $L$ , м	Максимальная скорость газовыделения, л/мин	Средняя скорость газовыделения, л/мин
20	3,85	3,62
14,5	4,95	3,87
13	7,99	5,50

За пределами нарушенной зоны, окружающей геологическое нарушение, и переходного участка между этой и ненарушенной зонами угольного пласта начальная скорость газовыделения в контрольный шпур не превышает 4 л/мин. При приближении к переходному участку ( $L=14,5$  м; 0,5 м шпура находится на переходном участке) максимальная скорость газовыделения повышается до 5 л/мин, хотя в среднем за 2 мин она также не превышает 4 л/мин. В третьем случае, когда фильтрующая часть шпура полностью расположена на переходном участке, максимальная скорость газовыделения повышается до 8 л/мин, средняя – до 5,5 л/мин. Таким образом, на переходном участке происходит постепенное повышение начальной скорости газовыделения в контрольный шпур.

**Выводы**

В результате проведения серии вычислительных экспериментов, в которых одиночная горная выработка проводится по пологому выбросоопасному угольному пласту вблизи тектонического нарушения, показано следующее.

Процессы десорбции метана в трещинно-поровое пространство угольного пласта и выделения метана в атмосферу выработки в ненарушенном угольном пласте носят ярко выраженный затухающий характер. В ненарушенной зоне за рассматриваемый период времени для принятых горно-геологических условий расход метана в выработку снижается в 5 раз, на переходном участке – всего в 1,3 раза. В ненарушенной зоне за этот же период времени объем десорбированного метана снижается в 6 раз, на переходном участке – в 1,3 раза. На переходном участке десорбционно-фильтрационные процессы, вызванные подвиганием забоя, затухают в 4-4,5 раза медленнее, чем в ненарушенной зоне, начальная скорость газовыделения в контрольный шпур постепенно повышается.

1. *Николин В.И.* Борьба с выбросами угля и газа в шахтах / В.И. Николин, И.И. Балинченко, А.А. Симонов. – М.: Недра, 1981. – 300 с.
2. *Бодня Г.В.* Особенности тектонических зон, опасных по внезапным выбросам угля и газа / Г.В. Бодня // Вопросы вентиляции и борьбы с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах: науч. сообщ. / Ин-т горного дела им. А.А. Скопинского. – М., 1977. – С. 88-92.
3. *Абрамов Ф.А.* Рудничная аэрогазодинамика / Ф.А. Абрамов, Г.А. Шевелев. – М.: Недра, 1972. – 274 с.
4. *Zienkiewicz O.C.* The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
5. *Лукинов В.В.* Моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений / В.В. Лукинов, А.П. Круковский, В.В. Круковская // Форум гірників-2007: Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. – С. 63-69.
6. *Круковская В.В.* Изучение параметров процесса выброса угля и газа с использованием компьютерного моделирования / В.В. Круковская // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVIII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С.157-159.
7. *Круковская В.В.* Особенности математического моделирования фильтрации метана вблизи тектонических нарушений / В.В. Круковская, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 124. – С. 115-127.
8. *Serafim J.L.* Rock Mechanics and Eng. Practice / J.L. Serafim, K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz. – Wiley, 1986. – 388 p.
9. *Круковская В.В.* Разработка метода расчета параметров процесса фильтрации метана с учетом напряженно-деформированного состояния подрабатываемого углепородного массива: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 : защищена 3.11.06 : утв. 14.12.06 / Круковская Виктория Викторовна. – Днепропетровск, 2006. – 134 с.
10. *СОУ 10.1.00174088.011-2005.* Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. Стандарт Мінвуглепрому України. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 222 с..

*В.В. Круковська, О.М. Молчанов*

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ПЕРЕБІГУ ДЕСОРБЦІЙНО-ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕКТОНІЧНО ПОРУШЕНІЙ ЗОНІ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА**

З використанням методів чисельного моделювання встановлено закономірності протікання нестационарних десорбційно-фільтраційних процесів у вугільному пласті у вибої гірничої виробки при переході з непорушеної зони вугільного пласта до тектонічно порушеної зони. Наведено графіки зміни проникності вугільного пласта, витрат метану і початкової швидкості газовиділення в непорушеній зоні вугільного пласта і на перехідній ділянці, що оточує викидонебезпечну зону. Показано, що на перехідній ділянці десорбційно-фільтраційні процеси, спричинені посуван-

ням вибою, загасають набагато повільніше, ніж в непорушеною зоні, початкова швидкість газовиділення в контрольний шпур поступово підвищується.

**Ключові слова:** фільтрація і десорбція метану, тектонічно порушена зона вугільного пласта, чисельне моделювання.

*V.V. Krukovskaya, A.N. Molchanov.*

## **REGULARITIES OF THE DESORPTION-FILTRATION PROCESSES IN THE ZONE OF TECTONIC DISLOCATION OF THE COAL SEAM**

Regularities of non-stationary desorption-filtration processes in the coal seam at the mine working face at the transition from the undisturbed coal seam zone to the zone of tectonic disturbances set using numerical simulation techniques. Graphs of coal seam permeability, methane discharge and the initial rate of gas emission in the undisturbed area of the coal seam and in the transition section surrounding outburst zone given in the article. It is shown that in the transition section desorption and filtration processes due to face advance decay much more slowly than in the undisturbed area. The initial rate of gas emission in the control hole is gradually increased.

**Keywords:** methane filtration and desorption, coal seam tectonically disturbed area, numerical simulation.