

УДК 622.831.332:551.24

**Круковский А.П.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Круковская В.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,  
(ИГТМ НАН Украины)

**ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ГАЗОНАСЫЩЕННОГО УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА  
ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ**

**Круковський О.П.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Круковська В.В.**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,  
(ІГТМ НАН України)

**ЗМІНА ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ГАЗОНАСИЩЕНОГО ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ  
ПРИ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩАХ**

**Krukovski A.P.**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,  
**Krukovskaya V.V.**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**CHANGING OF GEOMECHANICAL PARAMETERS  
OF GAS-SATURATED COAL-ROCK MASSIF  
UNDER GAS-DYNAMIC PHENOMENA**

**Аннотация.** В статье рассмотрены нестационарные связанные процессы упругопластического изменения напряженно-деформированного состояния трещиновато-пористой среды и фильтрации метана вокруг одиночной горной выработки в выбросоопасной и в ненарушенной зонах. При этом учитывалось влияние соотношения компонент тензора главных напряжений на изменение проницаемости массива. Приведены распределения значений параметров, характеризующих разнокомпонентность поля напряжений и разгрузку массива от горного давления, а также давления метана в различные моменты времени. Показано, что геомеханические и фильтрационные процессы протекают в динамическом режиме в нарушенной зоне угольного пласта вблизи тектонического нарушения, а в ненарушенной зоне – в квазистационарном режиме.

Приведены графики изменения геомеханических параметров угольного пласта в ненарушенной зоне и на движущемся фронте разрушения в течение времени протекания газодинамического явления. Показано, что при динамическом характере протекания процессов пик разнокомпонентности, так же, как и максимум напряжений, в течение первых 8 с отодвигается от забоя на расстояние около 2 м за каждые 2 с. Это соответствует росту полости разрушения на стадии протекания выброса. Затем скорость процесса изменения НДС на фронте разрушения снижается, рост полости разрушения замедляется, газодинамический процесс переходит на стадию затухания.

**Ключевые слова:** газодинамический процесс, изменение напряженного состояния, фильтрация метана.

Выбросы угля, породы и газа представляют собой сложное природное явление, возникающее в шахтах в результате нарушения горными работами равновесного состояния напряженного газонасыщенного массива [1].

Одним из методов его изучения является имитационное компьютерное моделирование физических процессов, основанное на численном решении системы уравнений, которые описывают данное явление. При помощи компьютерного моделирования исследуем изменение геомеханических параметров газонасыщенного углепородного массива на фронте разрушения при газодинамических явлениях.

Рассмотрим связанные процессы изменения напряженно-деформированного состояния трещиновато-пористой среды и фильтрации метана в нарушенной зоне вокруг одиночной горной выработки. При этом будем учитывать влияние соотношения компонент тензора главных напряжений на изменение проницаемости массива. Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное изотермическое движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P(t) &= \rho_n \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right), \quad i, j = x, y; \\ \frac{\mu_2}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k(\sigma_{ij}, t) \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(\sigma_{ij}, t) \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\mu_2}{\rho_2} q(t) &= 0; \\ k &= k_{техн} + k_{тектн}; \\ k_{техн}(\sigma_{ij}, t) &= \begin{cases} 0 & \text{при } Q < 0,7; \\ k_{\min} & \text{при } 0,7 < Q < 0,8; \\ f(\sigma_{ij}, t) = e^{\frac{2,58(\sigma_1(t) - \sigma_3(t))}{\sigma_2(t)} - 4,65} & \text{при } Q > 0,8; \\ k_{\max} & \text{при } P < 0,1; \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ ;  $t$  – время;  $X_i(t)$  – проекции внешних сил, действующих на единицу объема тела;  $T_i(t)$  – проекции сил, вызванных внутренним трением, действующих на единицу объема тела,  $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$ ;  $c_g$  – коэффициент демпфирования;  $u_i$  – перемещения;  $P(t)$  – проекции сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве;  $\rho_n$  – плотность породы;  $\rho_2$  – плотность газа;  $\mu_2$  – вязкость газа;  $p$  – его давление;  $q(t)$  – интенсивность источников газовыделения;  $k$  – полное поле коэффициентов проницаемости пород;  $k_{техн}$  – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки;  $k_{тектн}(x, y)$  – начальная, тектоническая проницаемость;  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$  и  $P = \sigma_3 / \gamma H$  – геомеханические параметры;  $\gamma$  – усредненный вес вышележащих горных пород;  $H$  – глубина разработки.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитыва-

ет возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в так и в результате отрыва.

Начальные и граничные условия:

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

где  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура;  $p_0$  – давление газа в нетронутом массиве.

Чтобы получить решение системы (1) на определенном временном промежутке, применяется конечно-разностный метод. При этом считается, что в начальный момент времени  $t = 0$  распределение напряжений и давления задано, и для достаточно малых значений  $\Delta t$  с помощью итерационных соотношений конечно-разностного метода получаем распределение напряжений, давления метана, скоростей его фильтрации и расходов на момент времени  $t + \Delta t$ . Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Условиями образования полости выброса считаются:

- 1) принадлежность конечного элемента области неупругих деформаций, вызванных растягивающими напряжениями;
- 2) выполнение критерия превышения градиентом фильтрации метана критического значения  $\text{grad } p > C_1$ .

Расчеты проводятся с применением метода конечных элементов. Шаг по времени составляет 0,1 с.

Рассмотрим два случая:

- выработка высотой 3 м проводится по ненарушенному угольному пласту;
- забой выработки высотой 3 м находится на расстоянии 7,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м (рис. 1), окруженного десятиметровой зоной перемятого угля, прочность которого на отрыв приблизительно равна нулю.

Мощность угольного пласта 1,5 м, глубина проведения выработки – 1200 м. Газоносность угля – 20 м<sup>3</sup>/т, содержание метана в свободной форме – 10 %, в сорбированной – 90 %. Вмещающая порода – аргиллит.

При выполнении расчета получим распределение значений параметра  $Q$ ,

отражающего разнокомпонентность поля напряжений, в различные моменты времени, рис. 2 и 3.

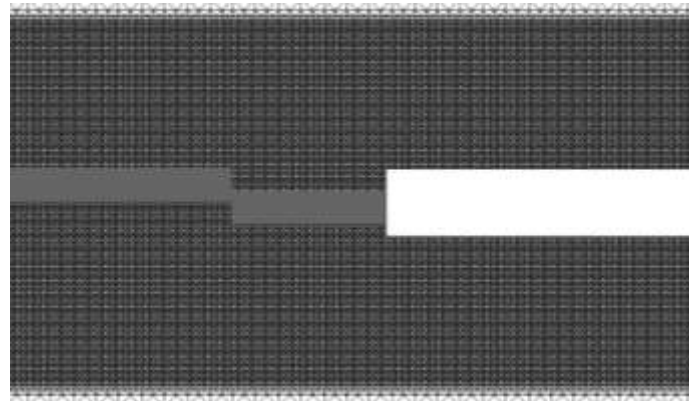


Рисунок 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

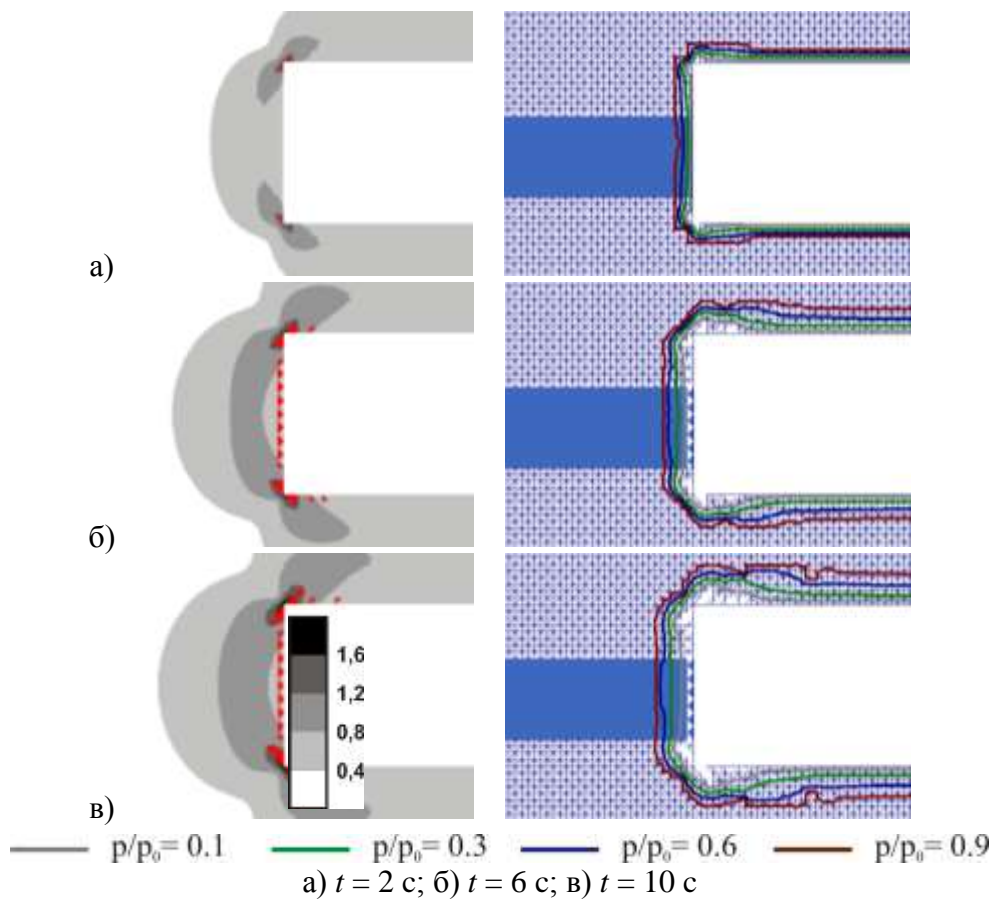


Рисунок 2 – Распределение значений параметра  $Q$ , зоны неупругих деформаций (слева) и относительное давление метана (справа) в ненарушенной зоне

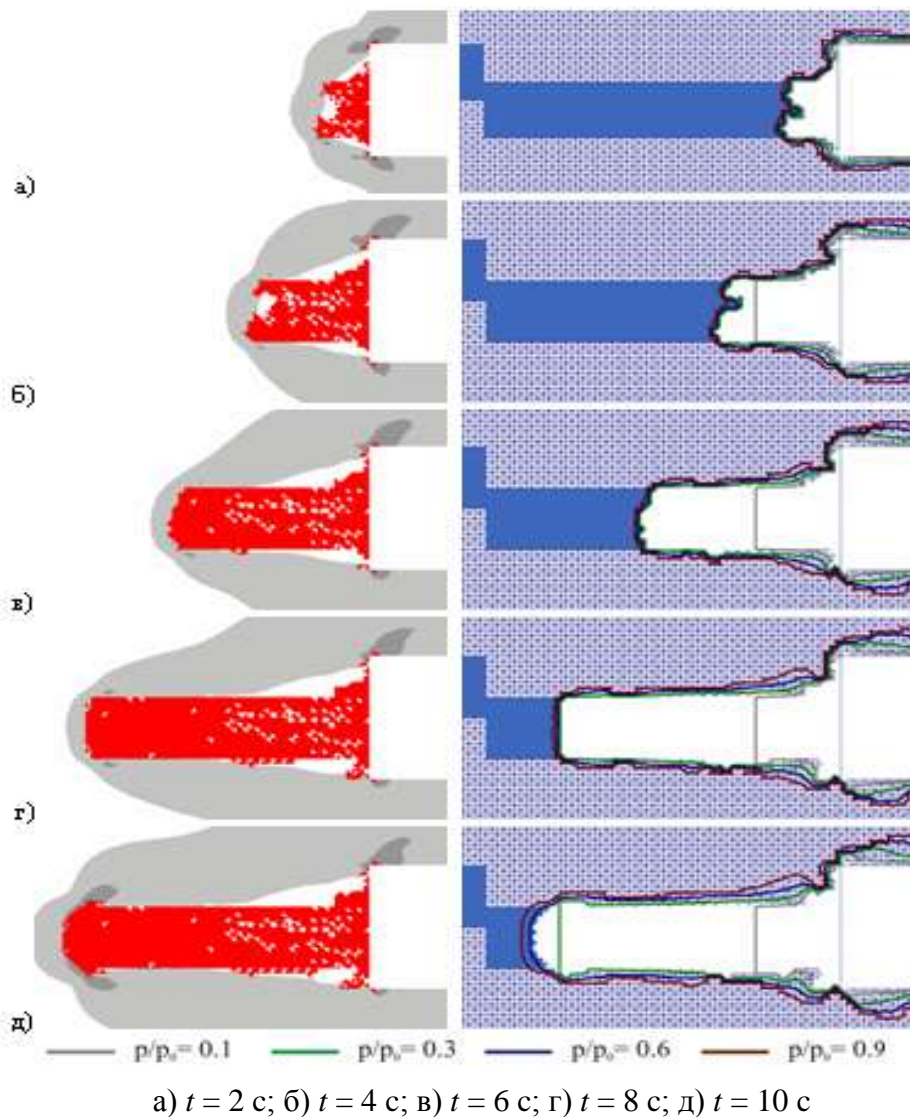


Рисунок 3 – Распределение значений параметра  $Q$ , зоны неупругих деформаций (слева), рост длины полости разрушения, относительное давление метана (справа) в выбросоопасной зоне вблизи тектонического нарушения

В ненарушенной зоне геомеханические и фильтрационные процессы развиваются постепенно, зона неупругих деформаций очень мала, область повышенной разнокомпонентности, в которой  $Q > 0,8$ , увеличивается медленно (рис. 2), так же медленно понижается давление метана в угольном пласте вблизи выработки. Проницаемость приконтурного массива увеличивается равномерно, согласно изменению напряженно-деформированного состояния пород вокруг выработки, образования полости выброса не происходит. Иными словами, все процессы носят квазистационарный характер, динамических явлений не наблюдается.

Вблизи тектонического нарушения, в зоне нарушения угольного пласта наблюдается совершенно иная картина протекания связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива и фильтрации метана, рис. 3. Область повышенной разнокомпонентности стреми-

тельно продвигается вглубь массива. Зона неупругих деформаций, в данном случае совпадающая с полостью разрушения, быстро растет от забоя выработки по угольному пласту. Давление метана в угольном пласте вблизи выработки быстро падает, градиенты давления и скорость фильтрации метана принимают очень высокие значения, проницаемость угля стремительно растет – происходит вынос угля и образование полости в угольном пласте, длина которой достигает 6,75 м при данных условиях.

Масса выброшенного угля при ширине выработки 4 м составляет 75,6 т.

Затем рост полости останавливается (рис. 3 д), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

Время протекания динамического процесса – 10 с.

Проведем серию вычислительных экспериментов, которые позволили бы проследить изменение геомеханических параметров на движущемся фронте разрушения в течение времени протекания газодинамического явления. Из рассчитанных массивов данных выберем значения параметра  $Q$  (рис. 4), параметра  $P$  (рис. 5) и приведенной максимальной (рис. 6) компонент тензора главных напряжений вдоль прямой, проходящей горизонтально по центру угольного пласта.

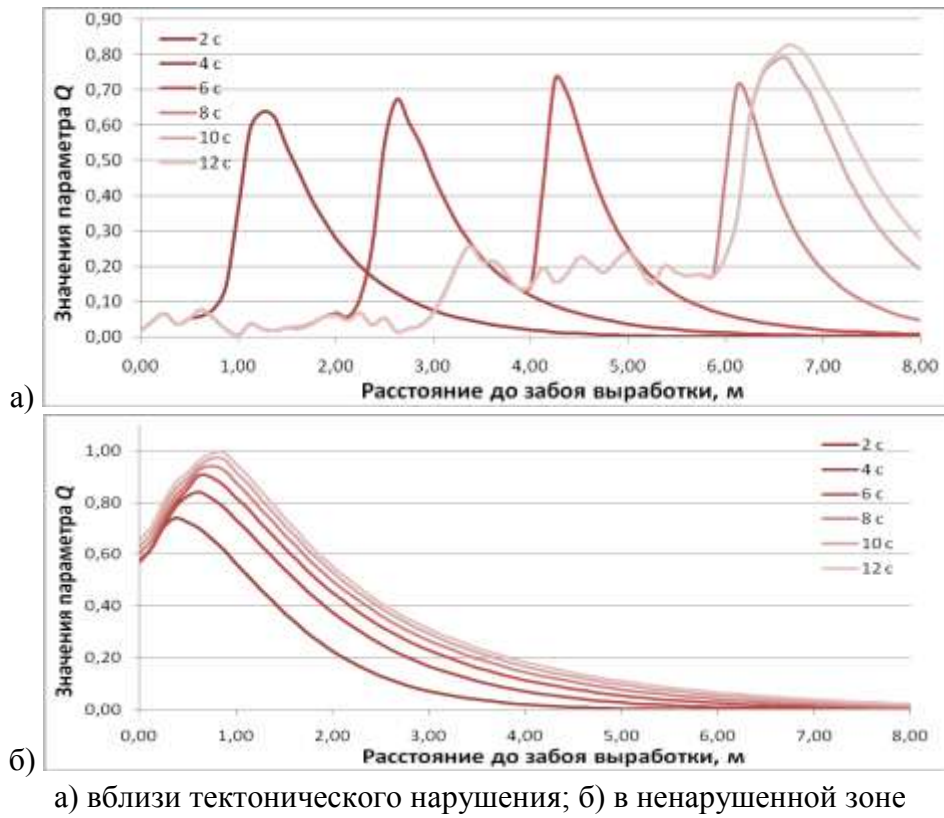
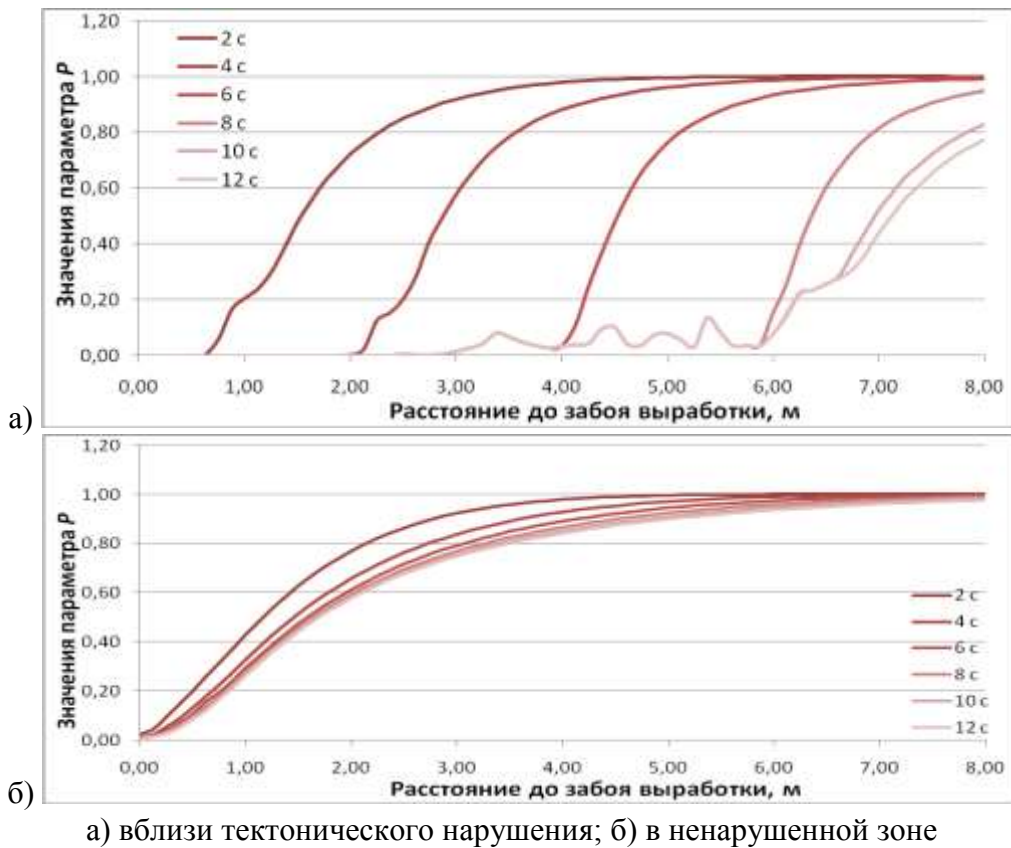
Для сравнения рядом приведены такие же данные при протекании рассматриваемых процессов в ненарушенной зоне.

В ненарушенной зоне, рис. 4 б, максимум разнокомпонентности поля напряжений со временем медленно отодвигается от забоя выработки, что говорит о постепенной разгрузке призабойной части угольного пласта и росте фильтрационной проницаемости в этой зоне.

При динамическом характере протекания процесса перераспределения поля напряжений вблизи тектонического нарушения, рис. 4 а, пик разнокомпонентности в течение первых 8 с отодвигается от забоя на расстояние около 2 м за каждые 2 с. Это соответствует росту полости разрушения на стадии протекания выброса. Затем скорость процесса изменения НДС на фронте разрушения снижается, рост полости разрушения замедляется, газодинамический процесс переходит на стадию затухания.

Параметр  $P$  характеризует степень разгрузки массива от горного давления. На рис. 5 б мы видим, как медленно происходит этот процесс в ненарушенной зоне угольного пласта.



Рисунок 4 – Распределение значений параметра  $Q$ Рисунок 5 – Распределение значений параметра  $P$

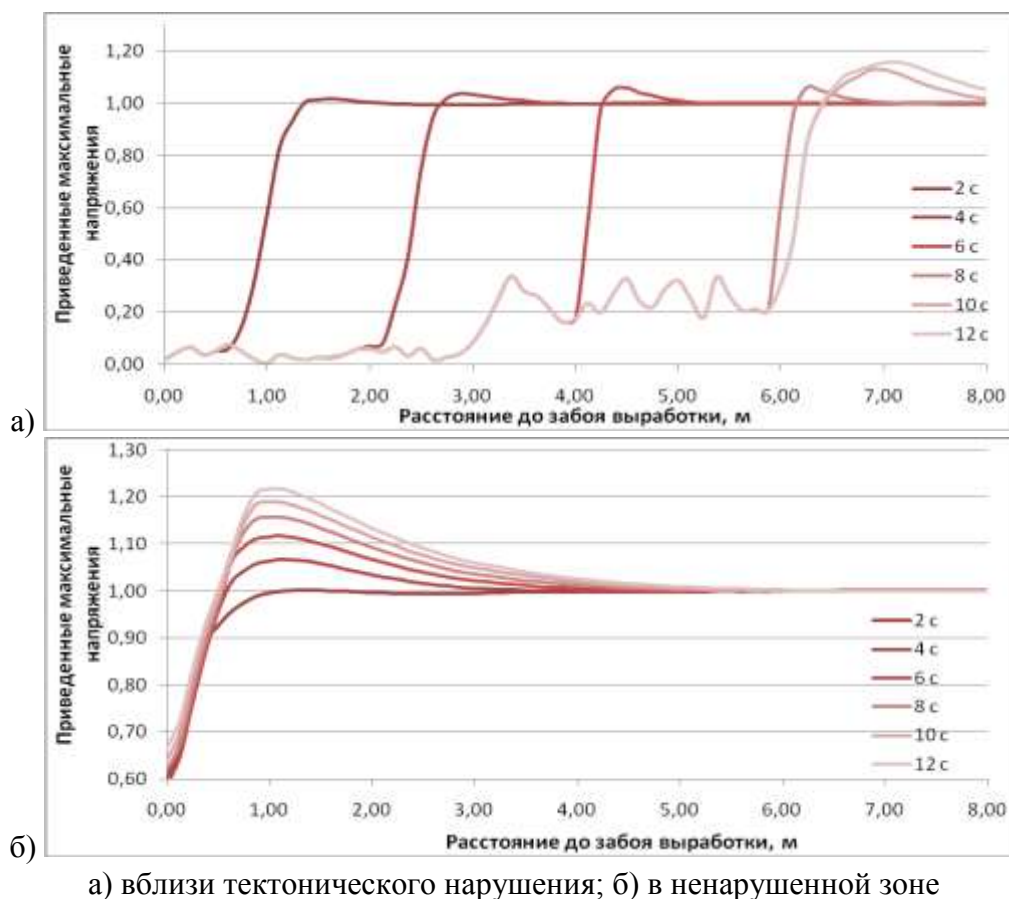


Рисунок 6 – Распределение значений приведенной максимальной компонент тензора главных напряжений

Вблизи тектонического нарушения разгрузка массива происходит в динамическом режиме, рис. 5 а, вместе с ростом полости разрушения. На стадии затухания газодинамического явления, 10-12 с, этот процесс возвращается к квазистационарному режиму.

При проведении выработки по ненарушенному угольному пласту максимум напряжений постепенно отступает от забоя вглубь горного массива, рис. 6 б. Во время протекания газодинамического явления, в каждый момент времени максимум напряжений находится перед вновь образованной свободной поверхностью полости разрушения, рис. 6 а.

### Выводы.

При анализе результатов численного моделирования связанных процессов изменения напряженно-деформированного состояния трещиновато-пористой среды и фильтрации метана в угольном пласте в забое одиночной горной выработки показано, что

- эти процессы протекают в динамическом режиме в нарушенной зоне угольного пласта вблизи тектонического нарушения, а в ненарушенной зоне – в квазистационарном режиме;

- в ненарушенной зоне геомеханические параметры изменяются медленно, что говорит о постепенной разгрузке призабойной части угольного пласта;

- при динамическом характере протекания процесса перераспределения поля



напружений вблизи тектонического нарушения пик разнокомпонентности, так же, как и максимум напряжений, в течение первых 8 с отодвигается от забоя на расстояние около 2 м за каждые 2 с. Это соответствует росту полости разрушения на стадии протекания выброса. Затем скорость процесса изменения НДС на фронте разрушения снижается, рост полости разрушения замедляется, газодинамический процесс переходит на стадию затухания.

---

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевелев, Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. – К: Наукова думка, 1989. – 160 с.
2. Круковская, В.В. Компьютерное моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений различных типов / В.В. Круковская, А.П. Круковский // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 80. – С. 238-250.

#### REFERENCES

1. Shevelev, G.A. (1989) *Dinamika vybrosov uglja, porody i gaza* [The dynamics of outbursts of coal, rock and gas], Nauk. dumka, Kiev, SU.
2. Krukovskaya V.V. and Krukovskiy A.P. (2008) “The simulation of the coal and methane outburst near tectonic faults of different types”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 80, pp. 238-250.

---

#### Об авторах

**Круковский Александр Петрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора института по научным вопросам, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [igtm@ua.fm](mailto:igtm@ua.fm)

**Круковская Виктория Викторовна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [gtm@ukr.net](mailto:gtm@ukr.net)

#### About the authors

**Krukovskiy Alexander Petrovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Deputy Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtm@ua.fm](mailto:igtm@ua.fm)

**Krukovskaya Victoriya Viktorovna**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [igtm@ukr.net](mailto:igtm@ukr.net)

---

**Анотація.** У статті розглянуті нестационарні зв'язані процеси пружно-пластичної зміни напружено-деформованого стану тріщинувато-пористого середовища та фільтрації метану навколо одиночної гірничої виробки у викидонебезпечній та у непорушеній зонах. При цьому враховувався вплив співвідношення компонент тензора головних напружень на зміну проникності масиву.

Наведено розподіл значень параметрів, що характеризують різнокомпонентність поля напружень і розвантаження масиву від гірського тиску, а також тиску метану в різні моменти часу. Показано, що геомеханічні і фільтраційні процеси протікають в динамічному режимі в порушеній зоні вугільного пласта поблизу тектонічного порушення, а в непорушеній зоні – в квазістационарному режимі.

Наведено графіки зміни геомеханічних параметрів вугільного пласта в непорушеній зоні і на рухомому фронті руйнування протягом часу протікання газодинамічного явища. Показано, що при динамічному характері протікання процесів пик різнокомпонентності, так само, як і максимум напружень, протягом перших 8 с відсувається від вибою на відстань близько 2 м за кожні 2 с. Це відповідає зростанню порожнини руйнування на стадії протікання викиду.

Потім швидкість процесу зміни НДС на фронті руйнування знижується, зростання порожнини руйнування сповільнюється, газодинамічний процес переходить на стадію загасання.

**Ключові слова:** газодинамічний процес, зміна напруженого стану, фільтрація метану.

**Abstract.** Time-dependent coupled processes of elastoplastic changes in the stress-strain state of fractured porous medium and methane filtration around a separate tunnel in the prone-to-outburst and undisturbed areas are considered in the article with taking into account impact of interaction between principal stress tensor components on permeability changes in the rock massif.

Distribution of values of the parameters which characterize difference between components of the stress field and rock pressure relief in the massif, and methane pressure in different time points are shown. It is further shown that geomechanical and filtration processes are in dynamic mode in the disturbed area of the coal seam near tectonic fault, and in a quasi-stationary mode in the undisturbed area.

Graphs of geomechanical parameters of coal seam in the undisturbed zone and in the moving front of destruction show behavior of the gas-dynamic phenomena in time. It is shown that maximum difference component of the stress field, as well as maximum stress during the first 8 seconds moves away from the face at a distance of about 2 meters per every 2 seconds at the dynamic mode of processes. It corresponds to destruction cavity increase at the stage of the outburst progress. Then, rate of the deflected mode change reduces in the front of destruction, growth of destruction cavity is slowing, and gas-dynamic process proceeds to step attenuation.

**Keywords:** gas-dynamic processes, changing of the stress state, methane filtration.

*Статья поступила в редакцию 20.03.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым*