

2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / М. 1967. Высшая школа. 600 с.

*N.O. Kaledina, A.N. Kachurin, I.V. Saricheva*

**THEORETICAL SUBSTANTIATION OF METHANE EMISSION  
INTO A DEVELOPMENT FACE FROM BROKEN COAL**

*The process of methane emission from broken coal into a development face was shown. Using mathematical model of methane diffusion in broken coal, which modeling equivalent spheres with the radius like some effective value defining distribution dependence of broken coal by fractions different sizes was substantiated. Results of calculation experiments were shown.*

*Key words: development face, broken coal, methane, diffusion, methane emission, mathematical model.*

Получено 20.04.11

УДК 622.272.63

В.В. Круковская, канд. техн. наук, (38050) 834-70-05,

А.П. Круковский, канд. техн. наук, (38050) 837-21-08, [igtm@ua.fm](mailto:igtm@ua.fm)

(Украина, Днепропетровск, ИГТМ НАН Украины)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ РАЗГРУЗОЧНЫХ ПОЛОСТЕЙ  
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК  
ПО ВЫБРОСООПАСНЫМ ПЛАСТАМ**

*Выполнено численное моделирование газодинамических процессов в забое подготовительной выработки, которая проводится по выбросоопасному угольному пласту с применением разгрузочной щели и без нее. Проведен сравнительный анализ геомеханических и фильтрационных параметров в этих двух случаях.*

*Ключевые слова: выбросы угля и газа, моделирование процесса выброса, предотвращение выбросов, разгрузочная полость.*

Разгрузочные полости во вмещающих породах применяются для предотвращения выбросов угля и газа при проведении подготовительных выработок смешанными забоями по выбросоопасным угольным пластам комбайнами избирательного действия или буровзрывным способом [1]. При этом происходит разгрузка угольного пласта в зоне опорного давления перед забоем, увеличение проницаемости угля повышает интенсивность фильтрационных процессов, вследствие чего опасная зона дегазируется.

Выполним компьютерное моделирование гео- и газодинамических процессов, происходящих вокруг одиночной горной выработки, которая проводится по выбросоопасному угольному пласту смешанным забоем, с целью:

1) тестирования математической модели для получения подтверждения численным решением системы дифференциальных уравнений доказанного на практике факта [1], что применение разгрузочных пазов предотвращает возникновение выброса;

2) расчета и сравнения параметров фильтрации метана в забое выработки, такие, как давление метана, скорость его фильтрации, газовыделение в выработку в единицу времени, при проведении выработок с применением разгрузочных пазов и без них в одинаковых горно-геологических условиях.

Рассмотрим процесс течения газа в трещиновато-пористой среде, которая деформируется под действием сил горного давления во время проведения одиночной горной выработки. Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное изотермическое движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [2]

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

где  $\sigma_{ij,j}$  – производные от компонент тензора напряжений по  $x, y$ ;  $t$  – время;  $X_i(t)$  – внешние силы;  $T_i(t)$  – силы, вызванные внутренним трением,  $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$ ;  $c_g$  – коэффициент демпфирования;  $u_i$  – перемещения;  $P(t)$  – сила давления газа;  $\rho_n$  – плотность породы;  $\rho_r$  – плотность газа;  $\mu_r$  – вязкость газа;  $p$  – его давление;  $q(t)$  – интенсивность источников газовыделения;  $k$  – полное поле коэффициентов проницаемости пород;  $k_{\text{техн}}$  – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки;  $k_{\text{тект}}(x, y)$  – начальная, тектоническая проницаемость, которая развивается в углях в результате тектонических процессов и является основным фактором их выбросоопасности;  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$  и  $P = \sigma_3 / \gamma H$  – геомеханические параметры.

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

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

Начальные и граничные условия

$$\begin{aligned}
 \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma h; & p|_{\Omega_1(t)} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} h; \\
 \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & p|_{\Omega_2} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \\
 \sigma_{zz}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & k_{\text{тект}} &= f(x, y); \\
 p|_{t=0} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{воды}} h; & u_x|_{\Omega_3} &= 0; \\
 & & u_y|_{\Omega_4} &= 0,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\gamma$  – усредненная плотность вышележащих горных пород;  $h$  – глубина разработки;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора;  $\gamma_{\text{воды}}$  – плотность воды;  $\Omega_1(t)$  – изменяющаяся во времени граница области фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренний контур (выработка);  $\Omega_3$  – вертикальные границы внешнего контура;  $\Omega_4$  – горизонтальные границы внешнего контура;  $p_v$  – давление воздуха в выработке.

Расчеты проводятся с применением метода конечных элементов. Шаг по времени составляет 0,1 с. Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3,0 м находится на расстоянии 8,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1,0 м, вокруг которого находится десятиметровая зона перемятого угля. 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 форме 90 %. Вмещающая порода – аргиллит.

При выполнении расчета получим распределение геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени. Результаты расчетов показаны на рис. 1, где видно, что в угольном пласте в забое выработки происходит резкое снижение давления метана, вызывающее увеличение скоростей его фильтрации. Высокие значения градиентов давления, скоростей фильтрации и растягивающие напряжения на поверхности забоя приводят к отрыву пластинок тектонически нарушенного угля. Откол угля и породы вызывает мгновенное обнажение новой поверхности забоя. Минимальная компонента тензора напряжений на этой поверхности равна нулю, а в непосредственной близости к ней еще сохраняются значительные сжимающие напряжения области опорного давления. Это обуславливает возникновение высоких градиентов напряжений на контуре образованной полости. Обнажается следующий поверхностный слой, и весь процесс повторяется снова. Другими словами, происходит развитие самоподдерживающегося процесса выброса угля и метана.

При данных граничных и начальных условиях время протекания динамического процесса 11 с. На первых секундах происходит инициация

выброса; в интервале 2...10 с – собственно процесс выброса, на 10...11 с – его затухание. В течение этого времени давление метана в угольном пласте вблизи выработки быстро падает, градиенты давления и скорость течения метана принимают очень высокие значения, проницаемость угля стремительно растет – происходит вынос угля и образование полости в угольном пласте (рис. 1, а-д), длина которой достигает 7,75 м при данных условиях. Затем рост полости останавливается (рис. 1, е), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

Затухание динамических процессов обусловлено повышением давления метано-воздушной смеси внутри полости выброса, которое увеличивается от 0,1 до 3 МПа из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля и временного повышения давления воздуха в самой выработке.

Теперь рассмотрим случай, когда при тех же начальных условиях подготовительная выработка проводится с разгрузочной щелью во вмещающих породах (рис. 2). Глубина разгрузочной щели 2 м.

Из рис. 2 видно, что в данном случае процесс выброса не развязывается, образования полости выброса не происходит. Изобары относительного давления метана, ограничивающие дегазированную область, постепенно отодвигаются от забоя. За рассматриваемый период времени разгруженная и дегазированная области распространяются на глубину до 2 м.

Разгрузочный паз изменяет распределение напряжений в забое выработки (рис. 3). В угольном пласте появляется разгруженная зона, в которой все три компонента главных напряжений очень малы:  $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx \sigma_3 \approx 0$ . Проницаемость в области под разгрузочной щелью максимальна, вследствие чего происходит интенсивная дегазация угольного пласта, и динамические явления не инициируются.

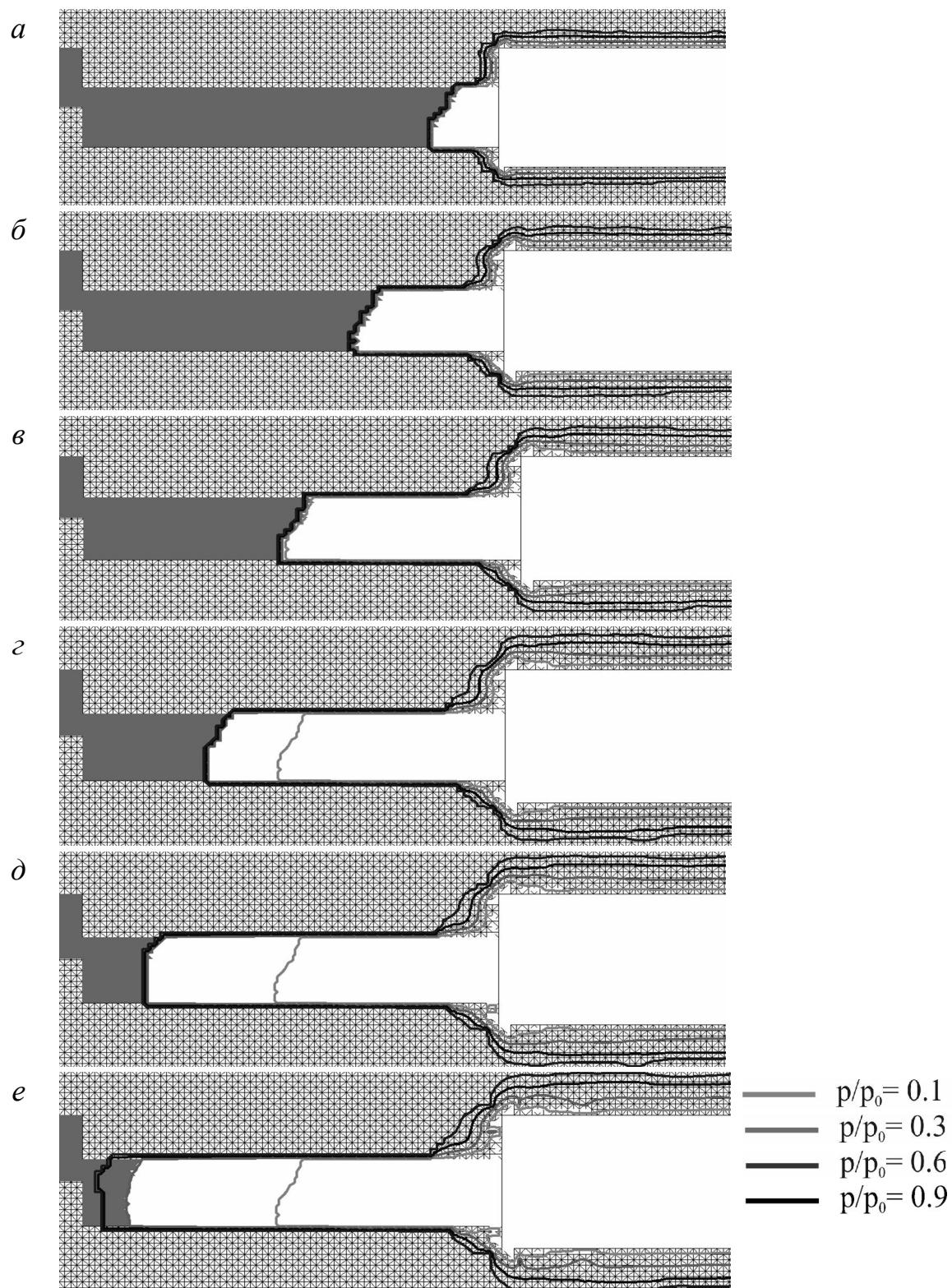
Построим графики изменения во времени фильтрационных параметров: максимальных скоростей фильтрации метана в забое выработки (рис. 4) и максимального газовыделения (рис. 5). Как видно из графиков, скорости фильтрации метана, а также значения максимального и суммарного газовыделения в забое выработки без разгрузочного паза поддерживаются на более высоком уровне в течение рассматриваемого времени.

Также можно отметить резкий рост значений параметров на стадии инициации выброса при  $t = 0...2$  с и их медленное снижение в течение основного времени.

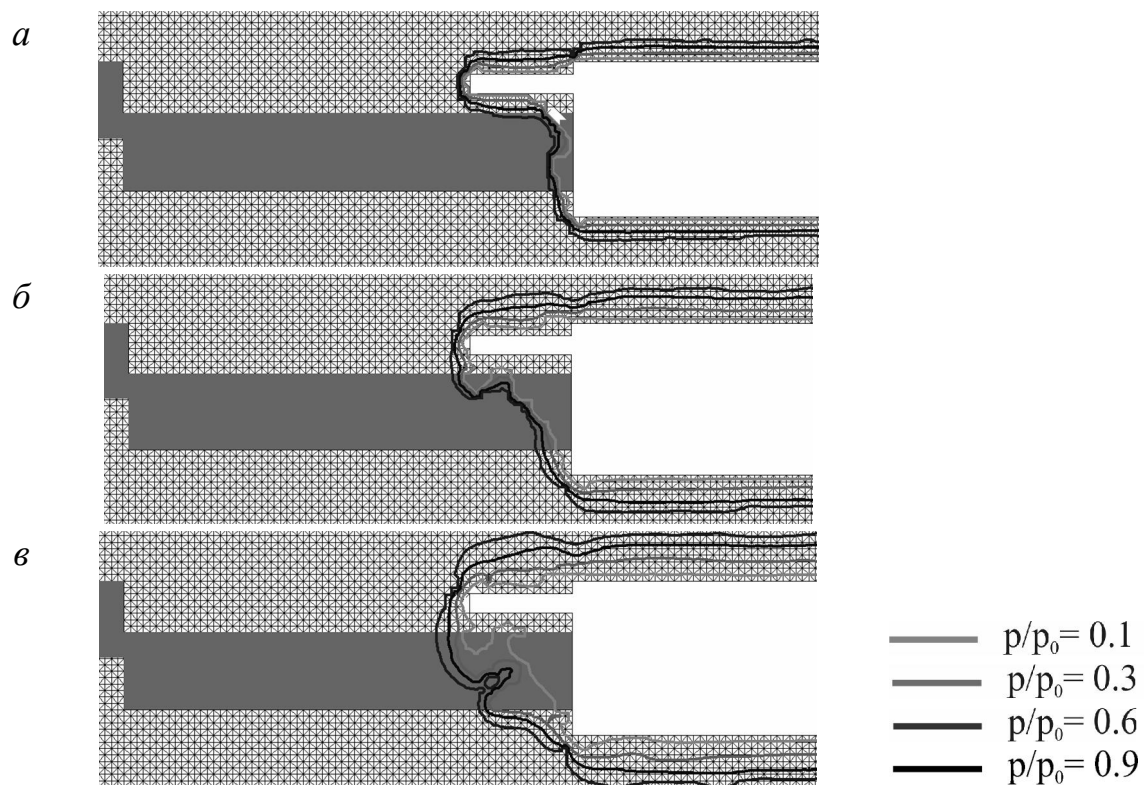
В результате анализа результатов численного моделирования можно сделать следующие выводы.

При всестороннем сжатии, когда  $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx \sigma_3 \gg 0$  (область вне зоны влияния выработки) вмещающие породы и угольный пласт плотно сжа-

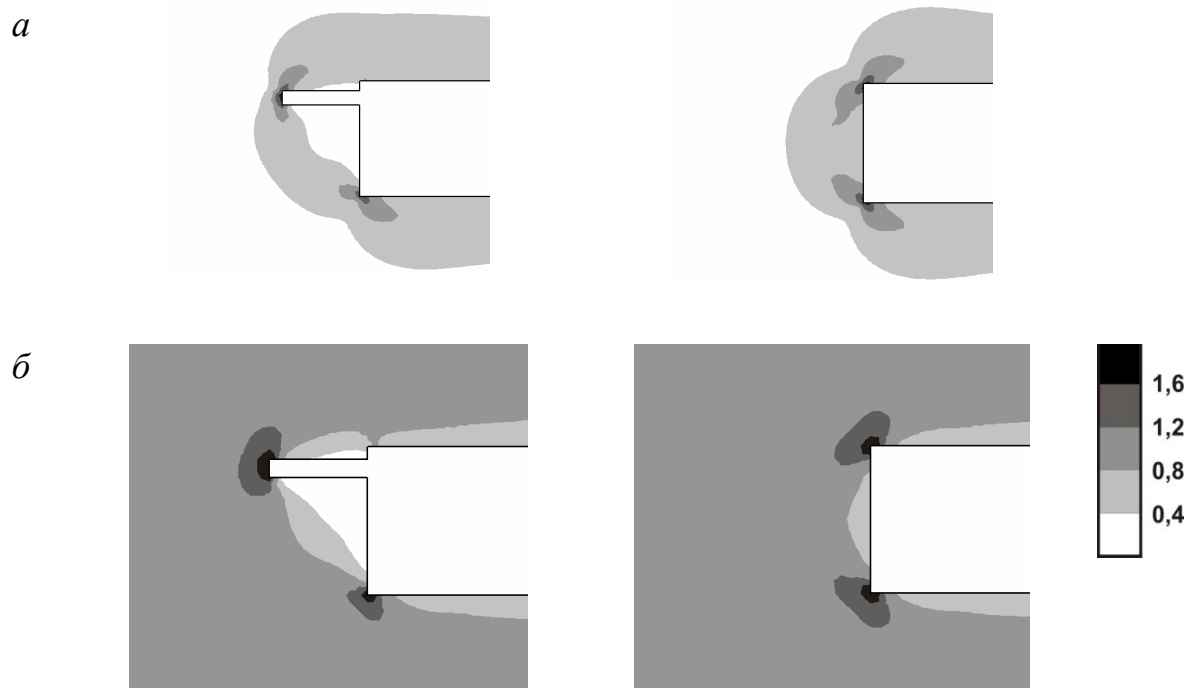
ты, проницаемость здесь практически равна нулю, хотя уголь вокруг тектонического нарушения препарирован, имеет сильно нарушенную структуру.



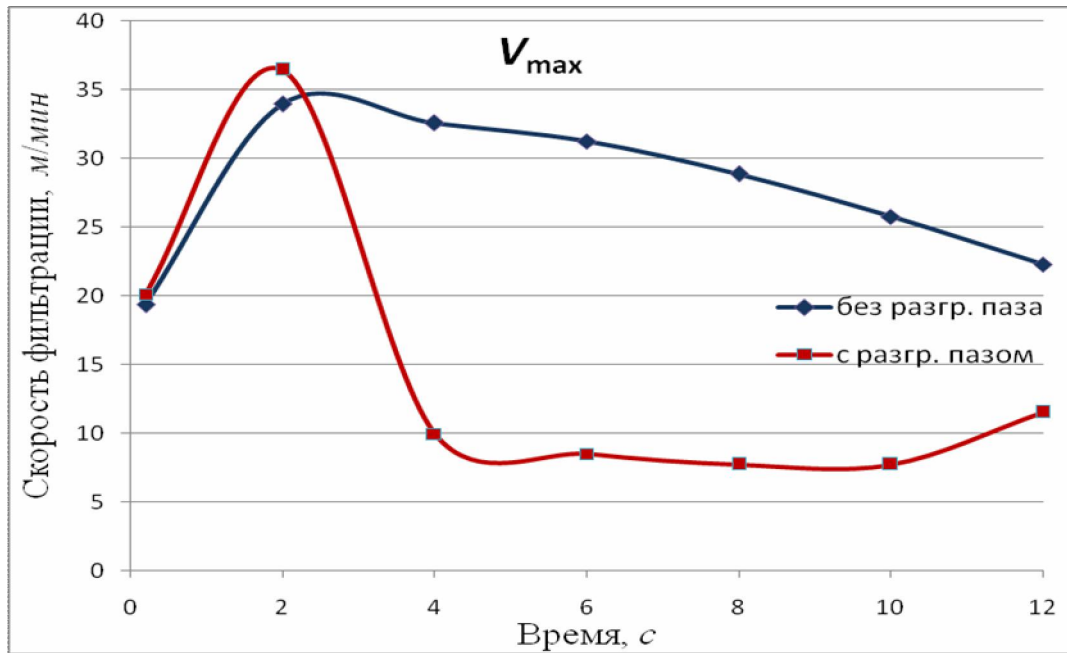
**Рис. 1. Рост полости выброса и относительное давление метана  $p/p_0$ : а -  $t = 2$  с; б -  $t = 4$  с; в -  $t = 6$  с; г -  $t = 8$  с; д -  $t = 10$  с; е -  $t = 12$  с**



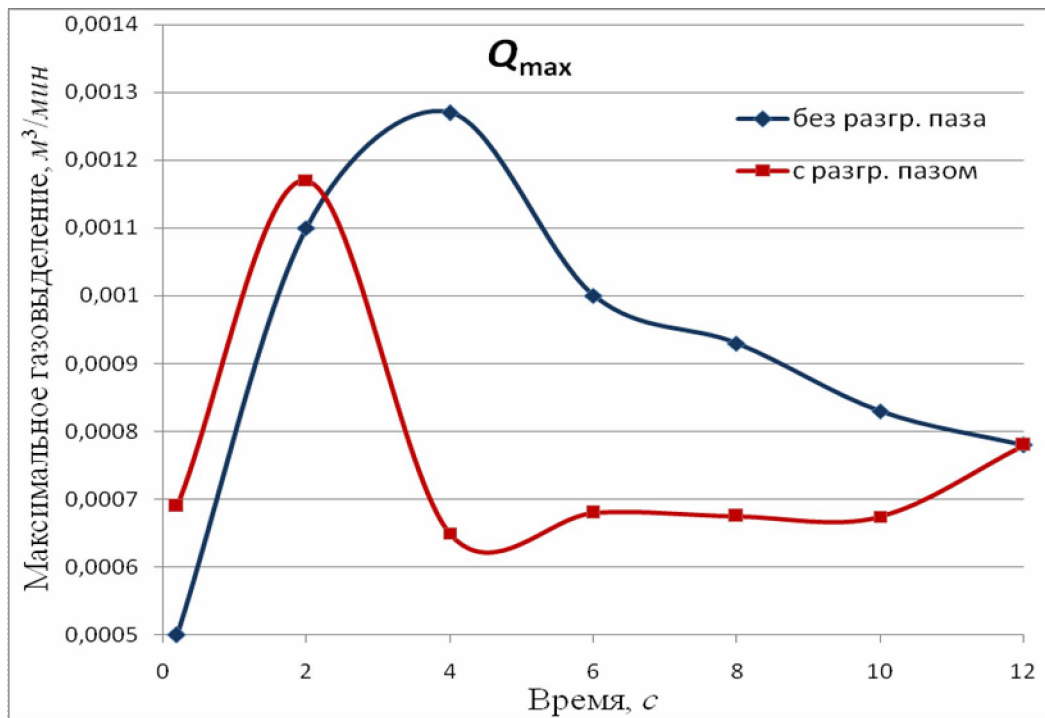
**Рис. 2. Относительное давление метана  $p/p_0$ ,  
выработка с разгрузочным пазом:  
а -  $t = 2$  с; б -  $t = 6$  с; в -  $t = 12$  с**



**Рис. 3. Распределение значений геомеханических параметров  
вокруг выработки с разгрузочным пазом и без него:  
а -  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ ; б - максимальные напряжения  $\sigma_1 / \gamma H$**



**Рис. 4. Изменение максимальной скорости фильтрации**



**Рис. 5. График изменения максимального газовыделения в точке пласта**

При разнокомпонентном сжатии  $\sigma_1 \gg \sigma_3$  плоскости трещинообразования в угольном пласте параллельны плоскости забоя выработки, проницаемость в направлении забоя минимальна. В этом случае скапливающийся в трещинах газ не выходит в атмосферу выработки, а способствует росту трещин и отрыву пластинок угля – происходит выброс. При этом

давление метана в течение основного времени протекания процесса резко падает с 8 МПа в глубине массива до 0,1...2 МПа на свободной поверхности полости выброса на расстоянии 0,15 м; градиенты давления метана на этом промежутке принимают большие значения, что обуславливает развитие скоростей течения метана, достаточных для разрыва расслоившегося угля на мелкие пластинки и выноса их на большие расстояния вглубь выработки. Давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса увеличивается с 0,1 до 3 МПа из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля и временного повышения давления воздуха в самой выработке.

Применение разгрузочной щели обеспечивает образование разгруженной области под щелью, в которой  $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx \sigma_3 \approx 0$ . Проницаемость здесь максимальна, угольный пласт перед забоем интенсивно дегазируется, выброс не происходит.

Таким образом, положительными результатами расчетов показана состоятельность предложенной математической модели, описывающей нестационарные процессы в гетерогенной среде.

### Список литературы

1. О продолжительности формирования разгруженной зоны в призабойной части выбросоопасных угольных пластов/ М.И. Большинский и [др.] // Шахтное стр-во. № 12. 1978. С. 7.

2. Круковская В.В. Изучение параметров процесса выброса угля и газа с использованием компьютерного моделирования //Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XVII Междунар. науч. школы. Симферополь: Таврич. нац. ун-т. 2008. С. 152.

*V.V. Krukovskay, A.P. Krukovskiy*

*MODELING ACTING UNLOADING CAVES BY ROADHEADING ON COAL SEAMS, WHICH DANGEROUS BY GAS AND COAL EMISSION*

*Numerical modeling gas-dynamic processes in development working face, which is driving in coal seams, which dangerous by gas and coal emission, with using unloading chink and without it was realized. Comparative analysis of geomechanical and filtration parameters of those two cases was advanced.*

*Key words: gas and coal emission, modeling process of emission, preventing emission, unloading cave.*

Получено 20.04.11