

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТКИ
БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ В РЕЖИМЕ
СОТРЯСАТЕЛЬНОГО ВЗРЫВАНИЯ**

Виконано чисельне моделювання геомеханічних та фільтраційних процесів навколо вибою одиночної гірничої виробки, що проводиться буровибуховим способом у режимі струсного підривання. Ураховано дію хвилі стискаючих напружень і напружень розтягу, що віддається від поверхні вибою. Проаналізовано зміну розподілів значень геомеханічних параметрів та параметрів течії метану під час вибуху.

**MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMECHANICAL AND
FILTRATIONAL PROCESSES AT THE DRIVE WORKING BY BLAST-
HOLE DRILLING IN MODE OF SHAKING BLASTING OPERATION**

Numerical modeling of geomechanical and filtrational processes in a working face of single opening, what is driving by blast-hole drilling in mode of shaking blasting operation, is executed. Action of a wave of compression stresses and stresses of tension which are reflected from a working face surface is considered. The analysis of values of geomechanical parameters and parameters of methane flow during to blast the face is carried out.

Взрывные работы на выбросоопасных пластах ведутся в режиме сотрясательного взрывания, направленного на защиту людей от опасных последствий внезапных выбросов [1, 2]. В результате организации производства взрывных работ с применением специальных схем расположения и взрывания шпуровых зарядов при отсутствии людей в проводимой выработке и в опасной зоне либо провоцируются выбросы угля и газа, либо снижается их частота и интенсивность. Заряды ВВ по углю рассчитываются как заряды камуфлетного рыхления для того, чтобы создать вокруг шпуров системы трещин [3]. В этом случае происходит интенсивная дегазация угольного пласта и снятие напряженного состояния в пределах контура выработки.

В природе часто встречаются случаи, когда две или больше физических систем взаимодействуют друг с другом. Решение подобных задач невозможно без одновременного решения нескольких систем уравнений. Такие системы называются связанными, и эта связь может быть слабой или сильной в зависимости от степени их взаимодействия. Связанные системы классифицируются как: 1) те, в которых связь происходит на поверхностях раздела области через граничные условия; 2) системы, в которых различные области взаимодействия накладываются (полностью или частично), и связь происходит через дифференциальные уравнения, описывающие различные физические явления [4].

Очевидно, что задача о воздействии взрыва зарядов ВВ при проведении одиночной горной выработки в режиме сотрясательного взрывания в газонасыщенном угленосном массиве является связанной задачей второго класса,

состоящей в определении нестационарного напряженно-деформированного состояния породного массива, распространения волны напряжений от взрыва зарядов и параметров нестационарной фильтрации метана. Изменение напряженно-деформированного состояния среды влечет за собой изменение ее проницаемости. Поле значений коэффициентов проницаемости обуславливает изменение параметров фильтрации газа, в том числе и его давление в трещинно-поровом пространстве. В свою очередь, изменение давления газа влияет на напряженное состояние среды. Кроме этого, во время распространения ударной волны скачок давления на ее фронте и зона растяжения (разрежения) за фронтом накладывают определенные возмущения на поле напряжений и поле давления газа.

Для упрощения расчетов примем, что взрывание шпуровых зарядов в забое выработки происходит одновременно. В этот момент времени в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений σ_{ij} дополнительные напряжения σ_{ij}^e , вызванные взрывом.

$$\sigma_{ij}^{полн} = \sigma_{ij} + \sigma_{ij}^e;$$

Для расчета радиальной $\sigma_r(r, t)$ и тангенциальной $\sigma_\varphi(r, t)$ составляющих волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний $r = (20 \div 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, Боровиков В.А. и Ванягин И.Ф. [5] предлагают использовать зависимости, полученные для крепких горных пород на основании лабораторных и натуральных экспериментальных данных:

$$\sigma_r(r, t) = \sigma_r^{\max} e^{-\alpha(\tau - \tau_n)} \frac{\sin \beta \tau}{\sin \beta \tau_n} [\varepsilon_0(\tau) - \varepsilon_0(\tau - \tau_+)],$$

$$\sigma_\varphi(r, t) = \sigma_r^{\max} \left\{ \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi \tau}{\tau_n}\right) [\varepsilon_0(\tau) - \varepsilon_0(\tau - \tau_n)] - e^{-\alpha(\tau - 2\tau_n)} \frac{\sin \beta(\tau - \tau_n)}{\sin \beta \tau_n} [\varepsilon_0(\tau - \tau_n) - \varepsilon_0(\tau - \tau_n - \tau_+)] \right\}$$

где $\tau = t - t_{np}$ – время с момента прихода волны напряжения в заданную точку r ; t – текущее время с момента взрыва ВВ; t_{np} – время прихода волны в заданную точку r ; $\tau_n = (a_1 + a_2 \bar{r})R_0$ – время нарастания амплитуды напряжения до максимального значения, c ; $\bar{r} = \frac{r}{R_0}$ – относительное расстояние; $\tau_+ = \pi/\beta$;

$\sigma_r^{\max} = 545 \frac{\rho_n c_n}{r^{-1,1}}$ – максимальное радиальное напряжение в заданной точке r ;

ρ_n – плотность породы; c_n – скорость звука в породе; $\sigma_\varphi^{\max} = (c_1 + c_2 r) \cdot \sigma_r^{\max}$ – максимальное тангенциальное напряжение в заданной точке r ; $\alpha = \beta \operatorname{ctg}(\beta \tau_n)$

– коэффициент, характеризующий крутизну нарастания и спада амплитуды волны напряжений во времени; $\beta = \frac{b_1 + b_2 r}{R_0}$ – коэффициент, характеризующий продолжительность положительной фазы волны напряжений; $a_1 = (0,02 + 0,87 \cdot 10^{-8} \rho_n c_n) \cdot 10^{-3}$, $a_2 = (0,19 + 0,122 \cdot 10^{-7} \rho_n c_n) \cdot 10^{-4}$, $b_1 = 150 + 27 \cdot 10^{-6} \rho_n c_n$, $b_2 = -0,2 \cdot 10^{-7} \rho_n c_n$, – размерные коэффициенты, зависящие от типа породы; $\varepsilon_0(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0, \end{cases}$ – разрывная функция нулевого порядка.

Когда волна сжатия подходит к открытой поверхности забоя, она отражается от нее, превращаясь в волну растяжения, центром которой является точка, симметричная центру взрыва относительно поверхности забоя.

Нестационарное напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное нелинейное движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [6, 7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P(t) &= \rho_n \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right), \quad i, j = x, y; \\ \mu_z \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t) &= 0; \\ v_x = k(x, y, \sigma_{ij}, \bar{v}, t) \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k(x, y, \sigma_{ij}, \bar{v}, t) \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \bar{v} &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \\ k &= k_{\text{мехн}}(x, y) + k_{\text{мехт}}(\sigma_{ij}, \bar{v}, t); \\ k_{\text{мехт}}(\sigma_{ij}, \bar{v}, t) &= \begin{cases} 0 & \text{при } Q < 0,7; \\ k_{\text{мин}} & \text{при } 0,7 < Q < 0,8; \\ f(\sigma_{ij}, t) = e^{\frac{2,58 \sigma_1(t) - \sigma_3(t)}{\sigma_2(t)} - 4,65} & \text{при } Q > 0,8; \\ k_{\text{макс}} & \text{при } P < 0,1; \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $Y_i(t)$ – сила воздействия взрывной волны; $T_i(t)$ – силы, вызванные внутренним трением, $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$; c_g – коэффициент демпфирования, определяемый экспериментально; u_i – перемещения; $P(t)$ – сила давления газа; ρ_n – плотность породы; μ_z – вязкость газа; p – его давление;

$q(t)$ – интенсивность источников газовой выделению; k – полное поле коэффициентов проницаемости пород; $k_{техн}$ – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки; $k_{тект}(x, y)$ – начальная, тектоническая проницаемость, которая развивается в углях в результате тектонических процессов и является основным фактором их выбороопасности; $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$ и $P = \sigma_3/\gamma H$ – геомеханические параметры; γ - усредненная плотность вышележащих горных пород; H - глубина разработки.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в результате отрыва [8, 9].

Начальные и граничные условия:

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

где λ - коэффициент бокового распора; $\gamma_{\text{воды}}$ - плотность воды; $\Omega_1(t)$ - изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_2 - внутренний контур (выработка); Ω_3 - вертикальные границы внешнего контура; Ω_4 - горизонтальные границы внешнего контура; $p_{\text{выр}}$ - давление воздуха в выработке.

Для моделирования действия взрыва в нашей задаче необходимо задать давление газов p_0 в точке взрыва. Давление на стенки шпура:

$$p_0 = p_d / 2,$$

где p_d - детонационное давление, определяющее величину импульса и бризантное действие ВВ.

Детонационное давление – один из основных параметров ударных волн [10].

Значения давления детонации были измерены авторами [10] для трех типов промышленных ВВ. Исходя из полученных данных, можно сказать, что $p_d = 1500 \div 24000 \text{ МПа}$. То есть, к начальным условиям (2) добавится следующее:

$$p|_{t=t_{взр}, x=x_{взр}, y=y_{взр}} = \frac{P_d}{2}, \quad (3)$$

где $t_{взр}$ - момент взрыва; $x_{взр}$, $y_{взр}$ - координаты центра взрыва.

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 Δt с помощью итерационных соотношений получаем распределение напряжений, давления метана, скоростей его течения и расходов на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Рассмотрим случай, когда выработка высотой 3 м проводится по выбросоопасному угольному пласту мощностью 1,5 м. Глубина проведения выработки – 1000 м. Газоносность угля – 20 м³/т, содержание метана в свободной форме – 10 %, в сорбированной – 90 %. Вмещающая порода – аргиллит. Свойства пород приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики пород

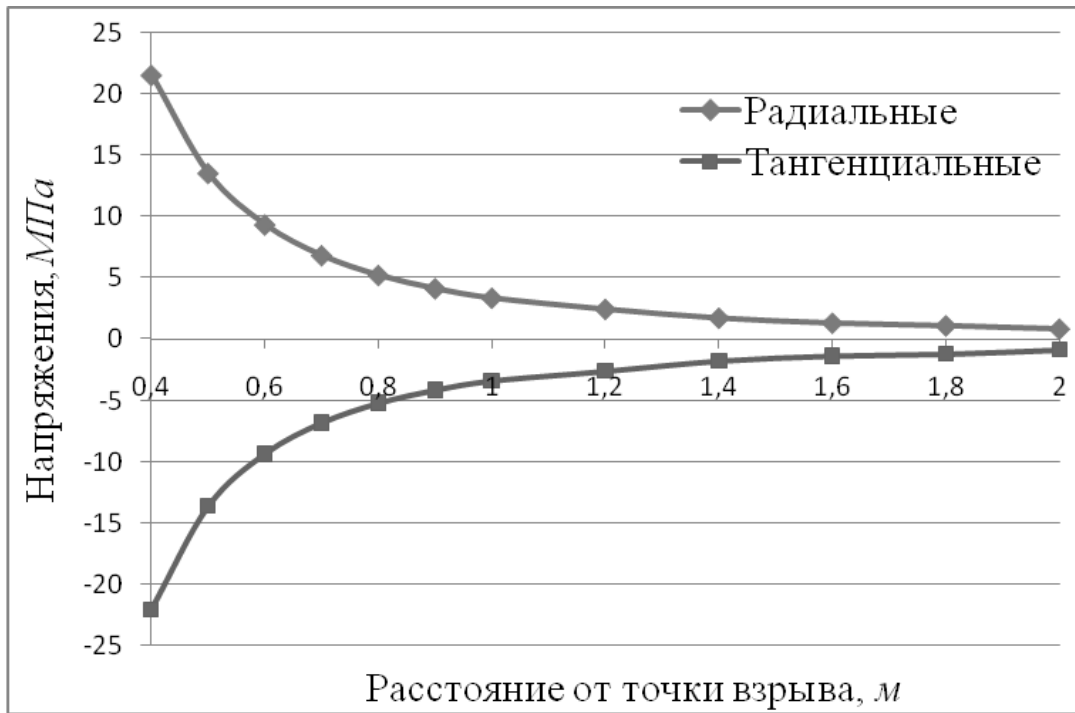
Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, C , МПа	Угол внутреннего трения, φ°	Прочность на растяжение, σ_p , МПа	Плотность, кг/м ³	Скорость звука в породе, м/с
Аргиллит	10^4	0,2	3,5	30	-2	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
Уголь	$5 \cdot 10^3$	0,2	1,75	30	-1	$1,25 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$

Выработка проводится буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания ($R_0 = 0,02 \text{ м}$, длина шпуров $l_{ш} = 2 \text{ м}$).

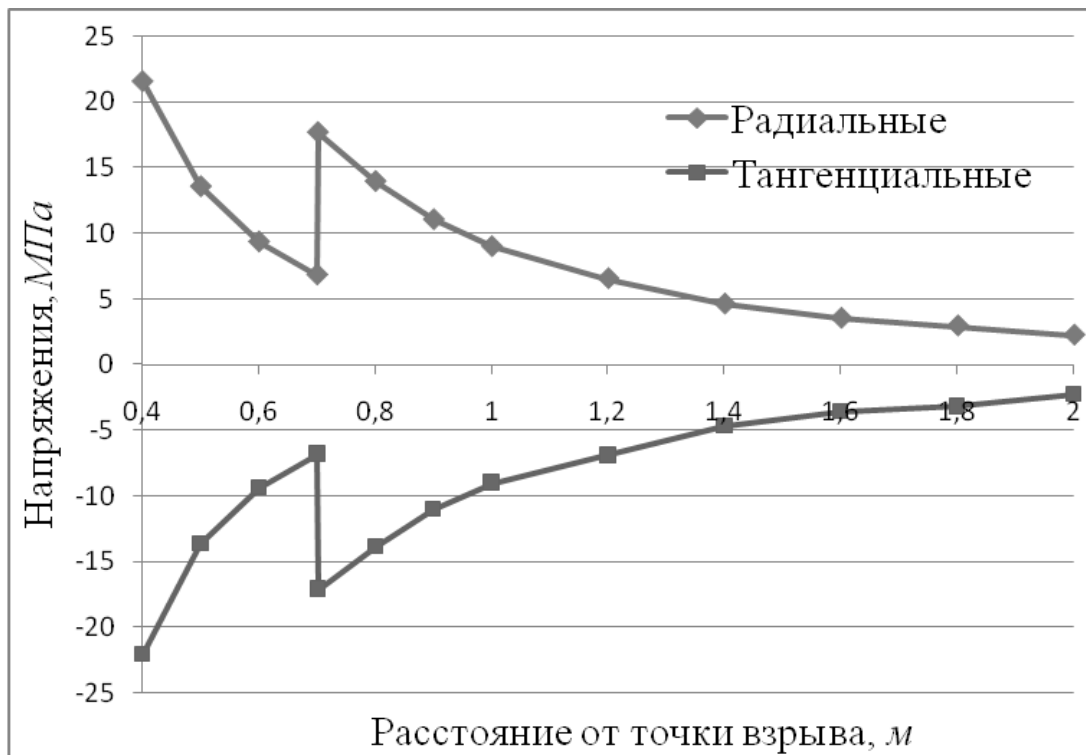
Для условий нашей задачи максимальные значения радиальных и тангенциальных напряжений на различных расстояниях от точки взрыва, рассчитанные по формулам Боровикова В.А., Ванягина И.Ф., показаны на рис. 1.

Волна напряжений от взрыва одного заряда в точке $r = 1,0 \text{ м}$ будет иметь вид (по формулам Боровикова В.А., Ванягина И.Ф.), рис. 2:

Расчеты проводятся с применением метода конечных элементов. Конечно-элементная сетка, шпуров для отбойки угля и породы (1-3) показаны на рис. 3. Шаг по времени составляет 0,1 с. Взрывание происходит в момент времени $t = 0,2 \text{ с}$.



а)



б)

а) горизонтальное направление; б) вертикальное направление
 Рис. 1 – Максимальные радиальные и тангенциальные напряжения на различных расстояниях от точки взрыва

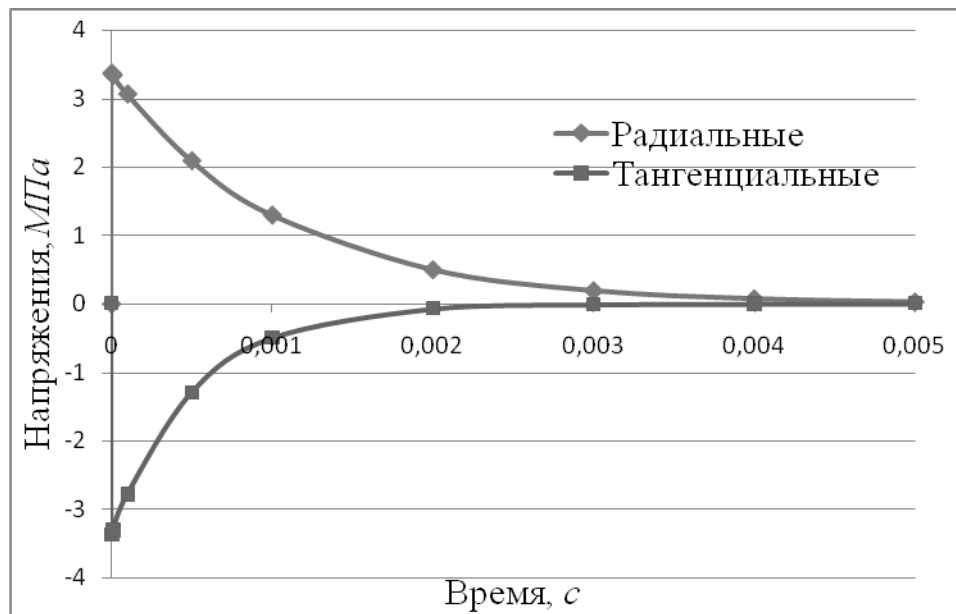


Рис. 2 – Волна напряжений в точке $r = 1,0$ м, угольный пласт

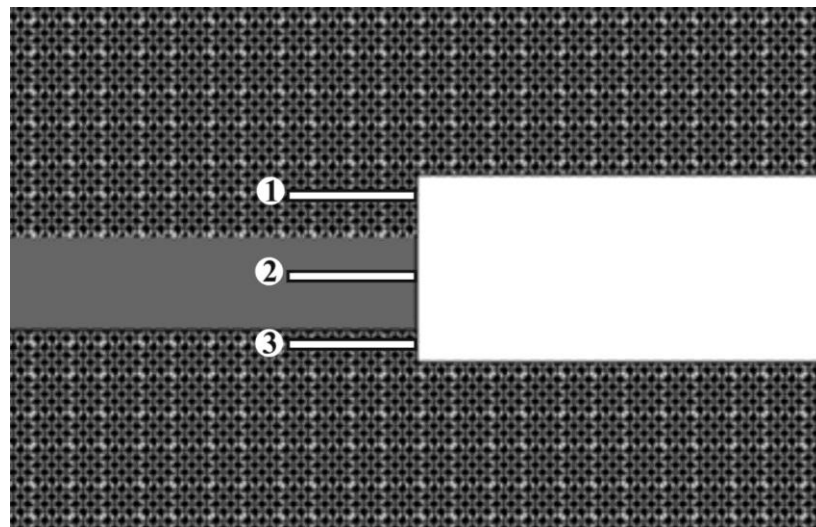
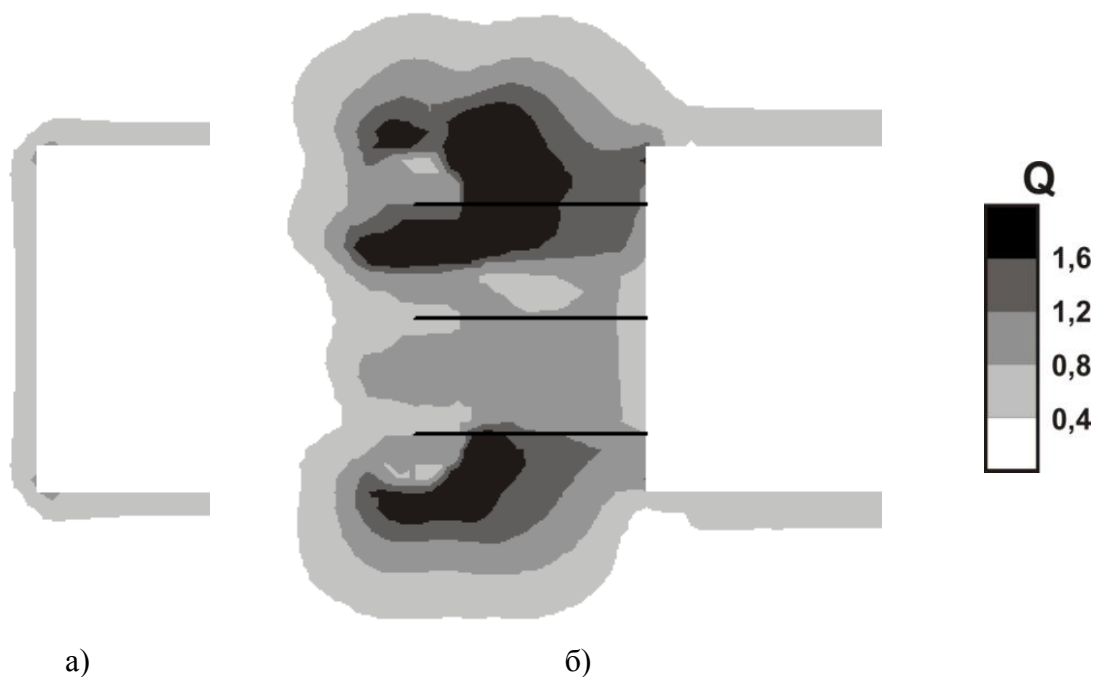


Рис. 3 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки с шпурами для отбойки угля и породы (1-3)

При выполнении расчета для случая сотрясательного взрывания зарядов 1-3 получим распределение геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени. На рис. 4 показано распределение значений параметра Q , который характеризует степень разнокомпонентности поля напряжений и возможность возникновения разрушения. На рис. 5 представлена область неупругих деформаций в момент взрыва.



а) до взрыва ($t = 0,1$ с); б) после взрыва ($t = 0,2$ с)
Рис. 4 – Распределение значений параметра Q

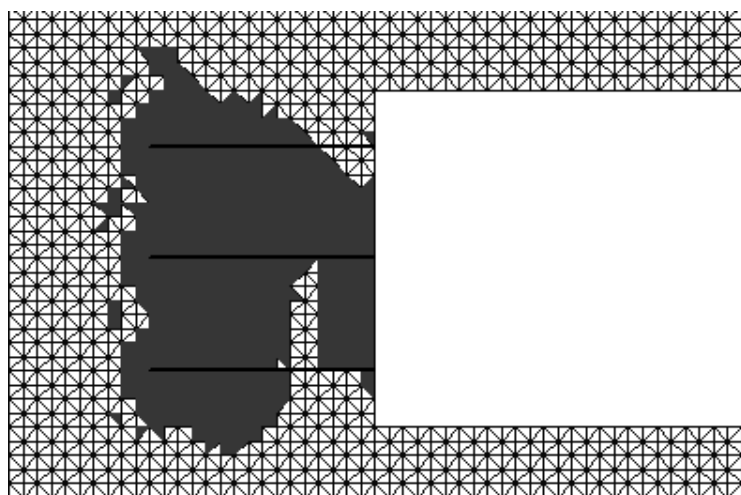
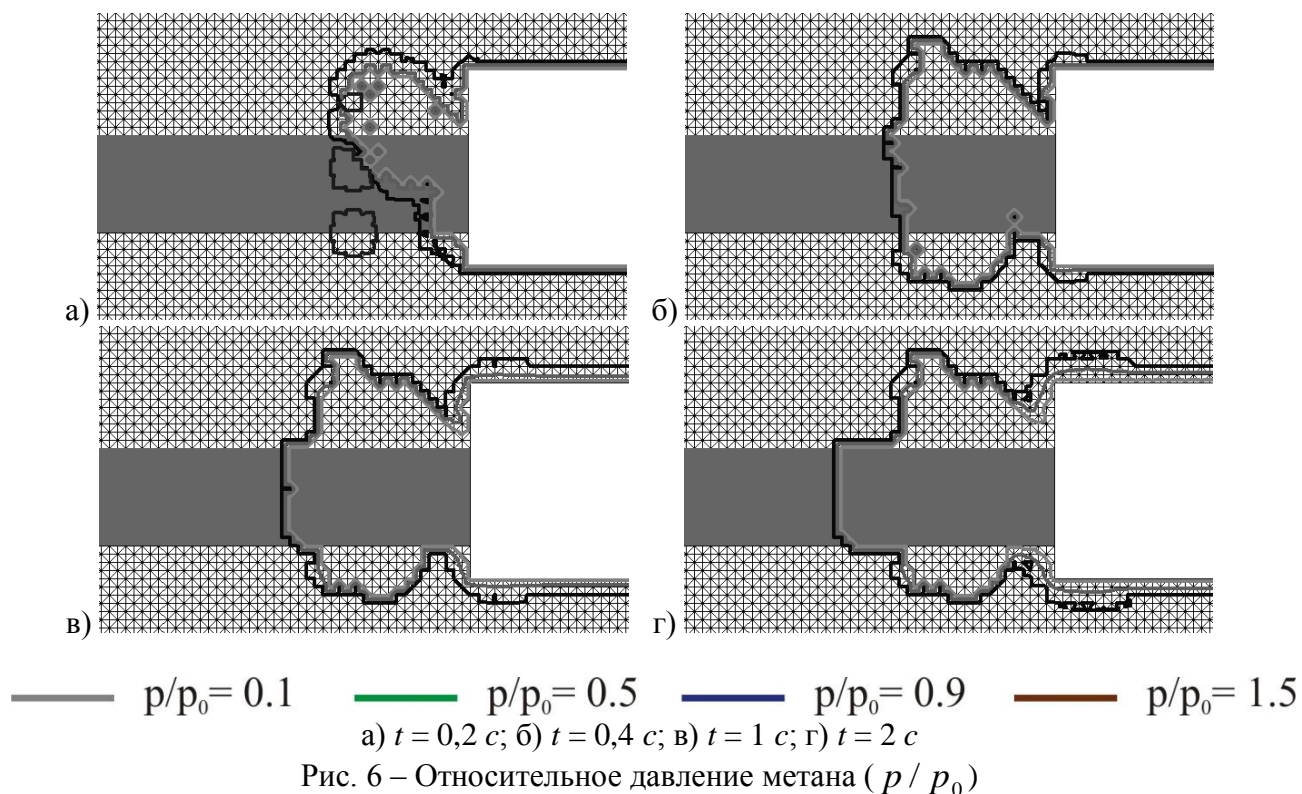


Рис. 5 – Зона неупругих деформаций, $t = 0,2$ с

Из рисунков видно, что в результате взрывов изменяется распределение напряжений впереди забоя. Вокруг каждого из зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, эти зоны от трех центров взрывов объединяются и формируют единую область глубиной $l_{ин}$. Далее расположена зона нарушенных пород с повышенной трещиноватостью.

На рис. 4б можно видеть, что значения параметра Q в угольном пласте меньше, чем во вмещающих породах. Это связано с различиями прочностных свойств угля и аргиллита – разрушение угля происходит при меньших значениях напряжений. Прилежащая к забою область, рис. 5, разрушается в результате действия отраженной от поверхности забоя волны растяжения.



На рис. 6 приведены изобары относительного давления метана перед забоем выработки. Серым цветом выделен угольный пласт.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что в результате взрывания зарядов 1-3 вокруг каждого из них образуется зона полностью разрушенных пород, эти зоны от трех центров взрывов объединяются и формируют единую область глубиной $l_{ин}$. Прилежащая к забою область разрушается в результате действия отраженной от поверхности забоя волны растяжения. Из рис. 6а, 6б видно, что относительное давление газа в разрушенной области меньше 0,1 – т.е. практически равно давлению воздуха в выработке. В центрах взрывов давление газа высоко, рис. 6а, но на следующих итерациях, рис. 6в, 6г, происходит интенсивная дегазация угольного пласта – давление метана в нем быстро снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов Н.Р., Таранов П.Я., Левит В.В., Гудзь А.Г. Разрушение горных пород взрывом: Учебник для вузов. – 4-е издание, переработанное и дополненное – Донецк, 2003. – 253 с.
2. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. // Стандарт Мінвуглепрому України. СОУ 10.1.00174088.011-2005. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 226 с.
3. Петросян А.Э., Иванов Б.М. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа. // В сб. науч. трудов ИГД им. А.А. Скочинского «Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа» – М.: Недра, 1978. – С. 3-61.
4. Zienkiewicz, O.C. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Sixth edition / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu. – Butterworth-Heinemann, 2005. – 772 p.
5. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
6. 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: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 152-154.

7. Круковская В.В., Круковский А.П. Компьютерное моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений различных типов. // Метан угольных месторождений Украины. Материалы пятой международной научно-практической конференции // Геотехническая механика: Сб. научн. тр./НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2008. - № 80. – С. 238-250.

8. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. –648 с.

10. Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1979. – 256 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Е.І. Єфремовим 18.08.09