

В.В. Круковская, А.П. Круковский, Ю.А. Виноградов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ШПУРОВ ПРИ БУРОВЗРЫВНОМ СПОСОБЕ ПРОХОДКИ НА ПРОТЕКАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ

Виконано чисельне моделювання процесу викиду вугілля та метану у вибої одиночної гірничої виробки, що проводиться буропідричним способом. Розглянуто ініціювання процесу викиду у випадках різної довжини шпурів для відбивання вугілля та породи. Проаналізовано зміну розподілів коефіцієнтів проникності поперед вибоєм, значень тиску газу та швидкості утворення порожнини викиду вугілля та газу.

Выполнено численное моделирование процесса выброса угля и метана в забое одиночной горной выработки, которая проводится буровзрывным способом. Рассмотрено инициирование процесса выброса в случаях различной длины шпуров для отбойки угля и породы. Проанализировано изменение распределений коэффициентов проницаемости впереди забоя, значений давления газа и скорости образования полости выброса.

Numerical modeling of process of coal and methane outburst in a working face of single opening, what is driving by drill and fire system, is executed. Initiation of coal and methane outburst process in cases of various length of blast-holes is observed. Change of distribution of permeability coefficient ahead of a face, pressure values and speed of formation of outburst cavity is analysed.

Взрывные работы на выбросоопасных пластах ведутся в режиме сотрясательного взрывания, направленного на защиту людей от опасных последствий внезапных выбросов [1, 2]. В результате специальной организации производства взрывных работ и применения особых 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. Это делается 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.

Целью работы является выявление условий возникновения выбросоопасной ситуации во время проведения взрывных работ в зависимости от длины шпуров для отбойки угля и породы и расчет параметров протекания процесса выброса путем проведения имитационного компьютерного моделирования.

Математическая постановка задачи. В природе часто встречаются случаи, когда две или больше физических системы взаимодействуют с друг 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 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 газонасыщенном углепородном массиве является связанной задачей второго класса, состоящей в определении нестационарного напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки, параметров нестационарной фильтрации метана и распространения ударной волны. 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 волны сжатия от взрыва заряда ВВ скачок давления на ее фронте и отраженная от поверхности забоя волна растяжения накладываются определенные возмущения на поле напряжений и поле давлений газа.

Для упрощения расчетов примем, что взрывание шпуровых зарядов в забое выработки происходит одновременно. В таком случае практически мгновенно забой подвигается на величину заходки $l_{\text{зах}}$. В этот же момент времени вглубь массива начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений σ_{ij} дополнительные сжимающие напряжения σ_{ij}^e , вызванные взрывом:

$$\sigma_{ij}^{\text{полн}} = \sigma_{ij} + \sigma.$$

Для расчета радиальной $\sigma_r(r, t)$ и тангенциальной $\sigma_\varphi(r, t)$ составляющих волны напряжений при

взрыве сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний

$$r = (20 - 100)R_0,$$

где R_0 – радиус заряда, В.А. Боровиков и И.Ф. Ванягин [5] предлагают использовать зависимости:

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

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

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; $\bar{r} = r/R_0$ – относительное расстояние; $\tau_+ = \pi/\beta$;

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

c_n – скорость звука в породе; $\sigma_\varphi^{\max} = (c_1 + c_2 \bar{r}) \cdot \sigma_r^{\max}$ – 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; $\beta = \frac{b_1 + b_2 \bar{r}}{R_0}$ – коэффициент, характеризующий продолжительность положительной фазы волны напряжений;

$$a_1 = (0,02 + 0,87 \cdot 10^{-8} \rho_n c_n) \cdot 10^{-3},$$

$$a_2 = (0,19 + 0,122 \cdot 10^{-7} \rho_n c_n) \cdot 10^{-4},$$

$$b_1 = 150 + 27 \cdot 10^{-6} \rho_n c_n, \quad b_2 = -0,2 \cdot 10^{-7} \rho_n c_n -$$

коэффициенты, зависящие от типа породы;

$$\varepsilon_0(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0, \end{cases} - \text{разрывная функция нулевого}$$

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]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) + T_i(t) + P(t) = \rho_n \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right),$$

$$i, j = x, y;$$

$$\mu_z \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t) = 0;$$

$$k = k_{\text{мехн}}(x, y) + k_{\text{мекм}}(\sigma_{ij}, \bar{v}, t); \quad (1)$$

$$k_{\text{мекм}}(\sigma_{ij}, \bar{v}, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } Q < 0,7; \\ k_{\min} & \text{при } 0,7 < Q < 0,8; \\ f(\sigma_{ij}, t) = e^{\frac{2,58 \sigma_1(t) - \sigma_3(t)}{\sigma_2(t)} - 4,65} & , Q > 0,8; \\ k_{\max} & \text{при } P < 0,1; \end{cases}$$

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 выделенности; k – полное поле коэффициентов проницаемости пород; $k_{\text{мехн}}$ – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки; $k_{\text{мекм}}(x, y)$ – начальная, тектоническая проницаемость; $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ и $P = \sigma_3 / \gamma H$ – геомеханические параметры.

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

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned} p|_{\Omega_1(t)} &= p_0 = 0,8 \cdot \gamma_{\text{вод}} h; \\ \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma h; & p|_{\Omega_2} &= p_v; \quad p_v = 0,1 \text{ МПа}; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & k_{\text{мекм}} &= f(x, y); \\ \sigma_{zz}|_{t=0} &= \lambda \gamma h; & u_x|_{\Omega_3} &= 0; \\ p|_{t=0} &= 0,8 \cdot \gamma_{\text{вод}} h; & u_y|_{\Omega_4} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где γ – усредненная плотность вышележащих горных пород; h – глубина разработки; λ – коэффициент бокового распора; $\gamma_{\text{вод}}$ – 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_v – давление воздуха в выработке.

Для моделирования действия взрыва в нашей задаче необходимо также задать давление газов p_6 в точке взрыва. Давление на стенки шпура [9]:

$$p_6 = p_d / 2,$$

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

Исходя из полученных авторами [9] данных, можно сказать, что детонационное давление для основных ВВ, применяемых на практике, изменяется в пределах $p_d = 1500 - 24000$ МПа. То есть, к начальным условиям (2) добавится следующее:

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

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

Чтобы получить решение системы (1) с начальными и граничными условиями (2) – (3) 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 ме-

тана, скоростей его течения и расходов на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Физическая постановка задачи. Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3 м находится на расстоянии 9,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м, вокруг которого расположена десятиметровая зона перемятого угля. Мощность выбросоопасного угольного пласта – 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.

Выработка проводится буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания. Радиус заряда – $R_0 = 0,025$ м, длину шпуров будем варьировать в пределах от 1,4 до 5,0 м.

Для условий нашей задачи максимальные значения радиальных и тангенциальных напряжений на различных расстояниях от точки взрыва, рассчитанные по формулам Боровикова В.А. и Ванягина И.Ф., показаны на рис. 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, ρ , кг/м ³	Скорость звука в породе, c , 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	$1,25 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$

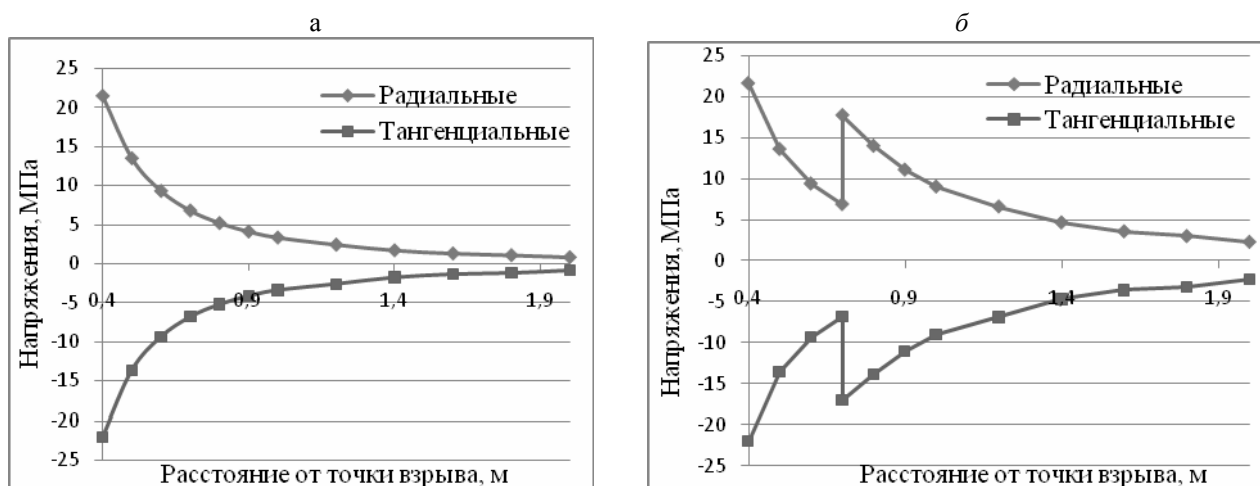


Рис. 1. Максимальные радиальные и тангенциальные напряжения на различных расстояниях от точки взрыва: а – в горизонтальном; б – в вертикальном направлении

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

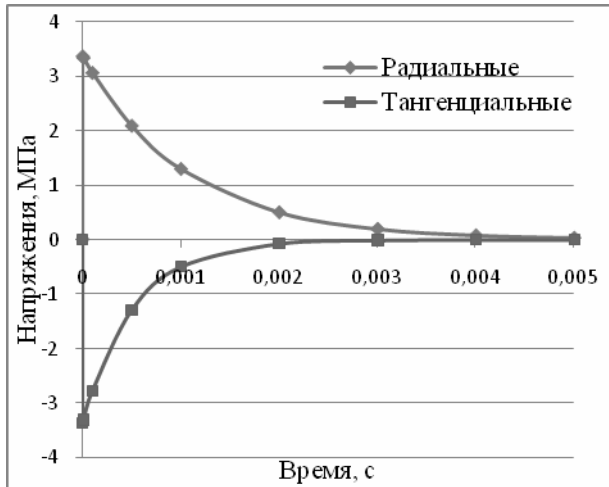


Рис. 2. Волна напряжений в точке $r = 1,0$ м, угольный пласт

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 $t = 0,2$ с.

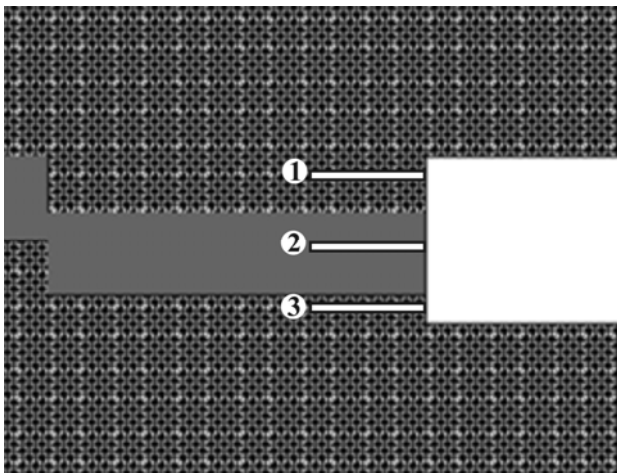


Рис. 3. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки со шпурами для отбойки угля и породы (1-3)

Результаты расчета. Выполним расчет для случая взрывания зарядов 1-3 с длиной шпуров $l_{ш} = 1,4; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ м. Получим распределения геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени. Анализ полученных данных показывает, что в первых двух случаях сразу же после взрывания шпуровых зарядов начинает развиваться процесс выброса угля и метана (рис. 4). Видно, что в момент взрыва, $t = 0,2$ с, в точках взрывания давление газа высокое, но уже на следующих итерациях зоны повышенного давления исчезают, в местах

взрывов образуется полость, сообщающаяся с выработкой, давление газа в ней практически равно атмосферному.

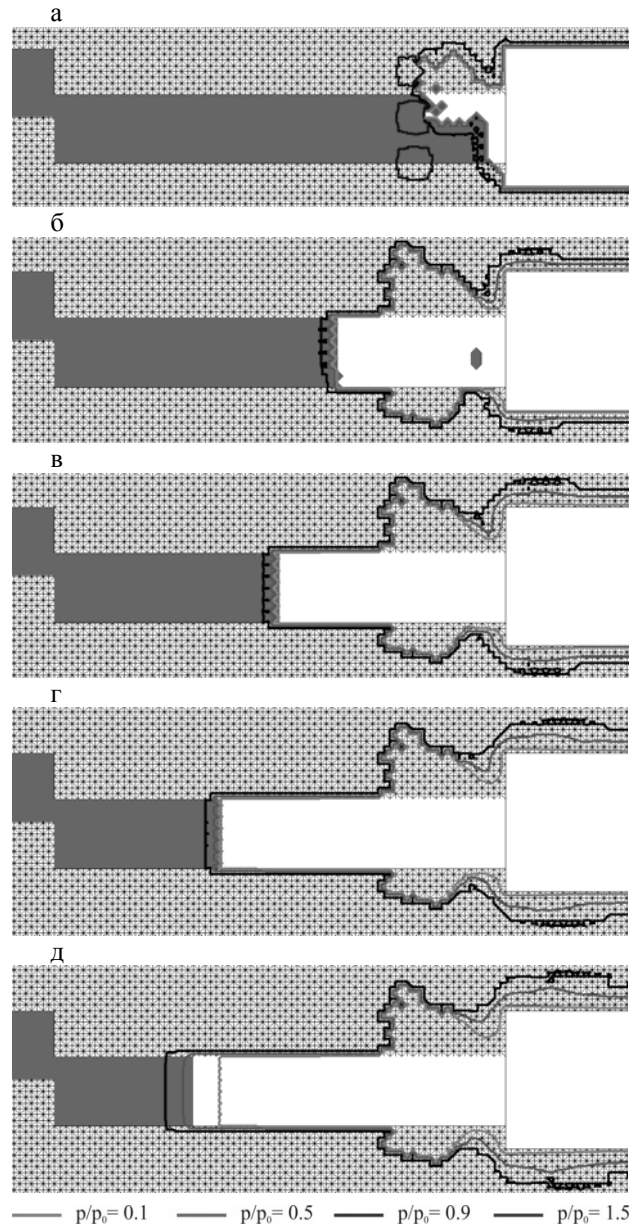


Рис. 4. Изобары относительного давления метана и рост полости выброса при $l_{ш} = 2,0$ м в моменты времени: а – $t = 0,2$ с; б – $t = 2$ с; в – $t = 4$ с; г – $t = 6$ с; д – $t = 8$ с

В случае $l_{ш} = 2,0$ м время протекания динамического процесса – 7 с. В течение этого времени градиенты давления принимают очень высокие значения. В угольном пласте происходит образование полости выброса, длина которой достигает 6,6 м. Затем рост полости останавливается (рис. 4, д), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

При $l_{ш} = 3,0$ м развитие процесса выброса начинается на 5-й секунде, рис. 5.

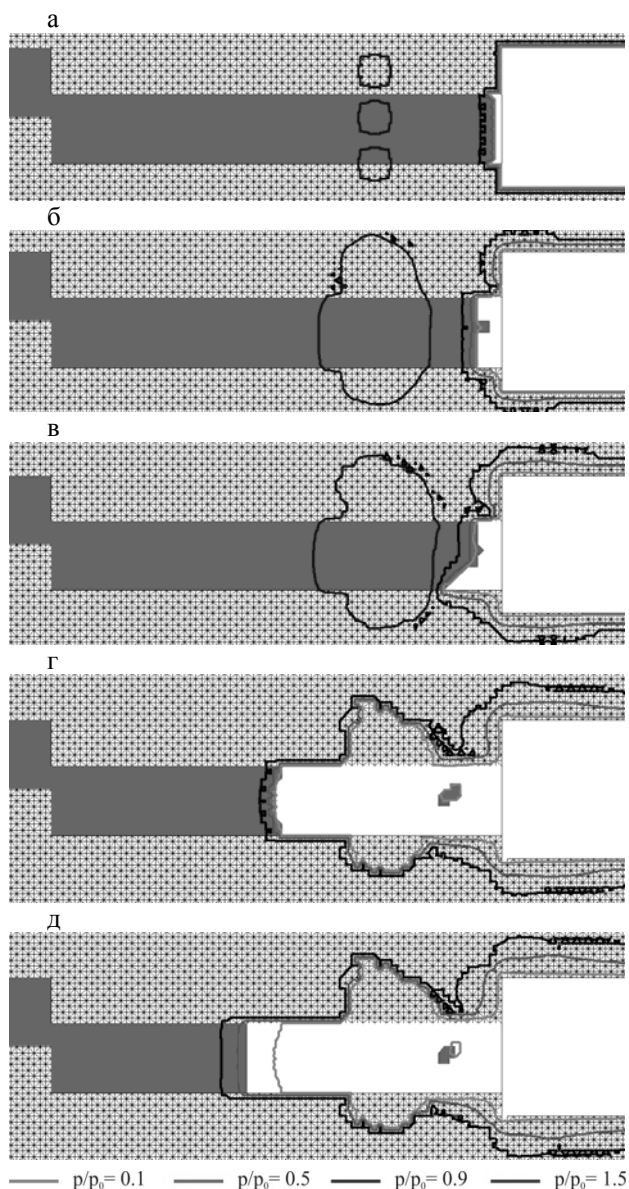


Рис. 5. Изобары относительного давления метана и рост полости выброса при $l_{ш} = 3,0$ м в моменты времени: а – $t = 0,2$ с; б – $t = 2$ с; в – $t = 4$ с; г – $t = 6$ с; д – $t = 8$ с

В этом случае время протекания динамического процесса составляет 3 с, в течение которых образуется полость длиной 5,5 м. Вплоть до начала выброса в массиве, в области взрывания зарядов сохраняется зона повышенного давления газа, которая исчезает только когда полость выброса достигает ее границ.

На рис. 6 приведены изобары относительного давления газа перед забоем выработки, когда длина шпуров равна 5,0 м. Как видно, при $l_{ш} = 5,0$ м, так же, как и при $l_{ш} = 4,0$ м, процесс выброса угля и метана не развивается. Зона повышенного давления в области

взрывания зарядов исчезает в результате фильтрации газа по нарушенному угольному пласту и породам в пространство выработки. Фильтрация происходит постепенно, в течение 30 с.

В забое выработки, в угольном пласте, образуется небольшая полость. Из-за малости объема высыпающегося угля это явление следует отнести скорее к вывалу или высыпанию угля.

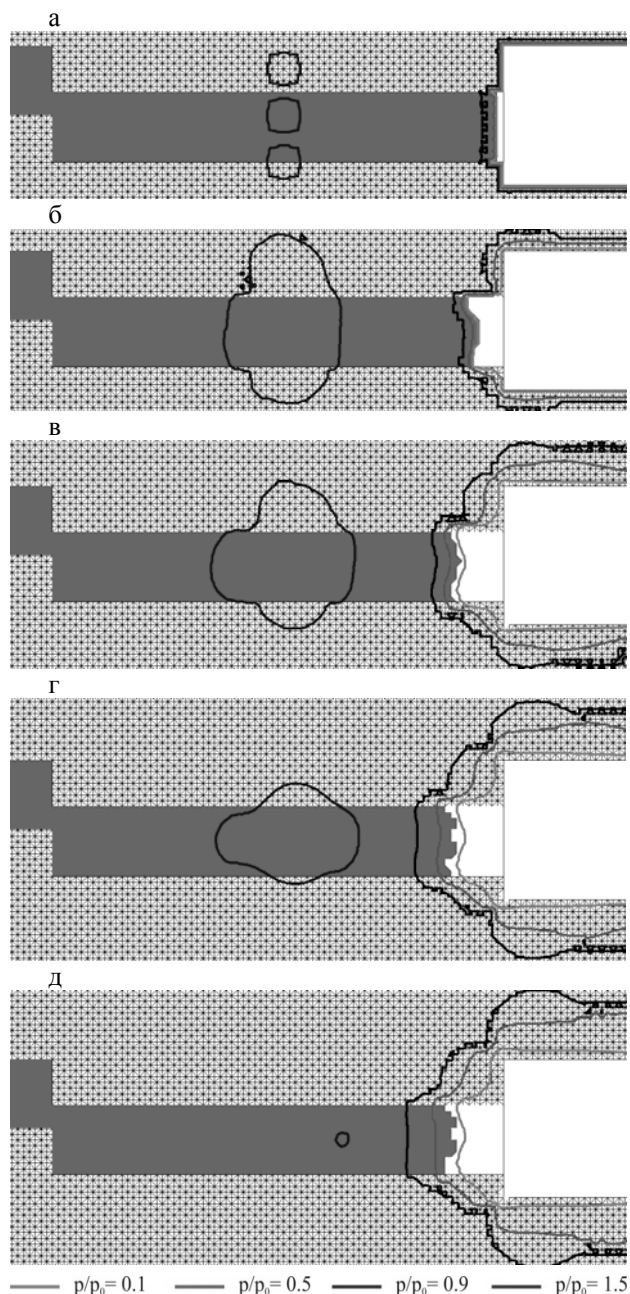


Рис. 6. Изобары относительного давления метана при $l_{ш} = 5,0$ м в моменты времени: а – $t = 0,2$ с; б – $t = 2$ с; в – $t = 10$ с; г – $t = 20$ с; д – $t = 30$ с

Напряженное состояние угольного пласта и вмещающих пород в местах взрыва шпуровых зарядов характеризуется повышенной степенью разнокомпонентности. Геомеханический параметр Q принимает

здесь высокие значения (рис. 7), что говорит о возможности возникновения разрушения в данной области.

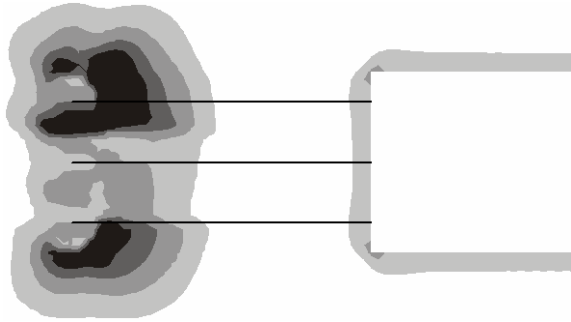


Рис. 7. Распределение значений параметра Q в момент взрыва, $l_{ш} = 5,0$ м

О значительном хрупком разрушении свидетельствует и область неупругих деформаций (рис. 8), расположенная в торцевой части шпуров. Однако эта область находится далеко от зоны отжима на поверхности забоя (рис. 8), вынос угля и породы в таком случае не происходит, и процесс выброса не провоцируется.

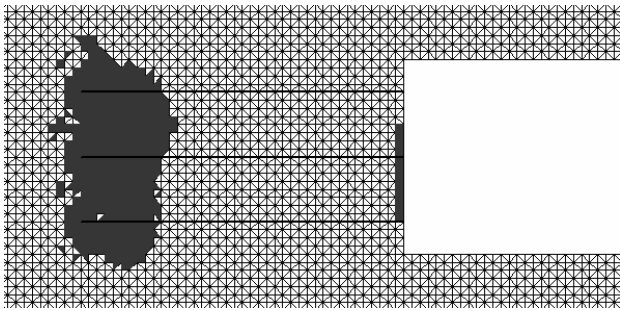


Рис. 8. Зона неупругих деформаций, $l_{ш} = 5,0$ м

Увеличение глубины зоны разгрузки призабойной части угольного пласта за счет опережающего взрывного воздействия используется для снижения интенсивности и частоты выбросов угля и метана при сотрясательном взрывании во время проведения подготовительных выработок смешанным забоем на особовыбросоопасных пластах, в зонах геологических нарушений и повышенного горного давления [10]. Этот способ называется способом передового рыхления угольного массива и вмещающих пород и заключается в предварительном взрывании в выбросоопасной зоне или над ней 2-3 зарядов рыхления, длина которых в 2 раза больше глубины шпуров, используемых для отбойки угля и породы.

На рис. 9 показано изменение максимального значения коэффициента проницаемости массива впереди забоя во время протекания динамических процессов в рассмотренных пяти случаях.

Видно, что при $L = 1,4; 2,0$ м увеличение проницаемости во время выброса происходит постепенно, значения коэффициента проницаемости в это время

находятся в пределах от 0,8 до 1,0 мДа (рис. 9). Если же взрывание шпуровых зарядов не сопровождается выбросом, как в случаях $L = 4,0; 5,0$ м (рис. 9), то в течение первых 5 с проницаемость массива принимает максимальные значения в местах взрыва, и эти значения в 2 раза выше, чем при $L = 1,4; 2,0$ м.

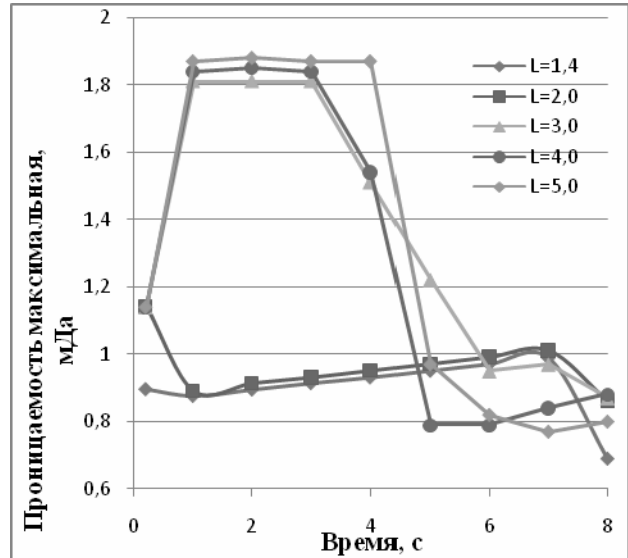


Рис. 9. Изменение максимального значения коэффициента проницаемости массива впереди забоя

Рост длины полости выброса показан на графиках, рис. 10. Скорость образования полости в случаях $L = 1,4; 2,0$ м составляет 0,86 м/с, в случае $L = 3,0$ м – 1,45 м/с.

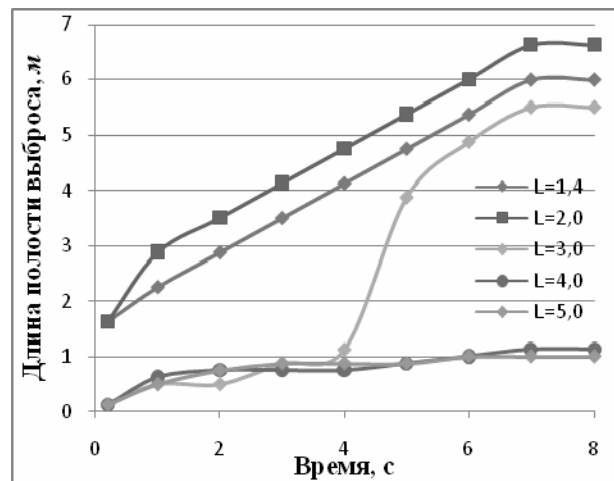


Рис. 10. Рост длины полости выброса

Выводы

По результатам имитационного моделирования можно сделать следующие выводы. Развитие процесса выброса угля и метана в выбросоопасной зоне тектонического нарушения при проведении выработки буровзрывным способом зависит от длины шпуров для отбойки угля и породы.

Показано, що при збільшенні довжини шпурів вероятність виникнення вибросів угля і метана знижується за рахунок збільшення глибини зони розгрузки призабойної частини угольного пласта. Опережуюче вибувне впливання використовується для зниження інтенсивності і частоти вибросів угля і метана при сотрясательном вибуванні в час проведення підготовительних виробок сумішним забоєм на особовибросоопасних пластах, в зонах геологічних порушень і підвищеного горного тиску.

Список літератури

1. Розрушення горних порід вибувом / Н.Р. Шевцов, П.Я. Таранов, В.В. Левит, А.Г. Гудзь: Учебн. для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – Донецк, 2003. – 253 с.
2. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ. – К.: Мінвуглепром України, 2005. – 226 с.
3. Петросян А.Э., Иванов Б.М. Причины возникновения внезапных выбросов угля и газа // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа: Сб. науч. трудов / ИГД им. А.А. Скочинского. – 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. // Геотехническая механика: Сб. научн. тр./НАН Украины ИГТМ. – Д., 2008. – № 80. – С. 238-250.
8. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
9. Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1979. – 256 с.
10. Инструкция по применению сотрясательного взрыва в угольных шахтах Украины. – Макеевка: МакНИИ, 1994. – 46 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Е.І. Єфремовим 25.11.09

УДК 622.831.001

© В.В. Фомичов, В.О. Соцков, 2010

В.В. Фомичов, В.О. Соцков

ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ШАХТИ, ЯКА ВРАХОВУЄ ГЕОМЕХАНІЧНИЙ СТАН ГІРСЬКОГО МАСИВУ

Наведена методика формування інформаційної системи шахти, яка оснований на контролі геомеханічного стану гірничого масиву, що вміщує підземні споруди вугледобувного підприємства.

Представлена методика формування інформаційної системи шахти, оснований на контролі геомеханічного стану горного масиву, вміщаючого підземні споруди вугледобувного підприємства.

The technique of formation of information system of mine based on the account of a geomechanical condition of rock mass of the coal-mining enterprise containing underground construction is presented.

Більшість шахт України функціонує в складних гірничо-геологічних умовах. Тому для цих шахт не можна використовувати звичайний підхід до розробки та впровадження інформаційної системи управління виробництвом. Така інформаційна система повинна володіти рядом особливостей, які дозволять ефективно керувати процесом видобутку вугілля в складних та аварійних ситуаціях [1]. Це ситуаційне управління не можливе без обліку поточного стану гірського масиву, в межах якого розташовуються підземні споруди шахти.

Основну частину цих проблем можливо вирішити під час проектування інформаційної системи шахти, ввівши у неї можливість обліку особливостей поведінки

гірського масиву. Під час видобутку корисних копалин стан гірського масиву може кардинально змінитися за короткий проміжок часу [2]. Тому визначення стану гірського масиву в реальному масштабі часу стає головним принципом проектування інформаційної системи шахти. Така система управління вимагає особливої логічної структури, здатної реалізувати головний принцип проектування системи в повному обсязі і не за рахунок скорочення функціональності другорядних задач управління.

Загальну логічну структуру інформаційної системи шахти можливо представити у вигляді багаторівневої ієрархії (рис. 1): I – рівень логічних блоків; II – рівень логічних контурів; III – рівень початкових за-