

**ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫБРОСА УГЛЯ И ГАЗА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИНЫ ШПУРОВ ДЛЯ ОТБОЙКИ
УГЛЯ И ПОРОДЫ**

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.

**CHANGE OF PARAMETERS OF THE COAL AND GAS OUTBURST
DEPENDING ON LENGTH OF BLAST-HOLES FOR COAL AND ROCK
BREAKING**

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.

Задача о взрыве зарядов ВВ в газонасыщенном углепородном массиве с одиночной выработкой является связанной задачей второго класса, состоящей в определении изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния породного массива, параметров нестационарной фильтрации метана и распространения взрывной 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 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 же момент времени вглубь массива начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле

напряжений дополнительные сжимающие напряжения, вызванные взрывом.

Для расчета радиальной $\sigma_r(r, t)$ и тангенциальной $\sigma_\phi(r, t)$ составляющих волны напряжений от взрыва сосредоточенного заряда, в диапазоне расстояний $r = (20 \div 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, будем использовать зависимости Боровикова В.А. и Ванягина И.Ф. [4].

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.

Напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки, проницаемость среды и нестационарное движение газа в нарушенном массиве описываются системой уравнений [5]:

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

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t – время; $X_i(t)$ – внешние силы; $Y_i(t)$ – 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_c – вязкость газа; p – его давление; $q(t)$ – интенсивность источников газовой выделенной; k – полное поле коэффициентов проницаемости пород; $k_{\text{мехн}}$ – технологическая проницаемость, вызванная перераспределением поля напряжений в результате проведения горной выработки; $k_{\text{мект}}(x, y)$ – начальная, тектоническая проницаемость, которая развивается в углях в результате тектонических процессов; $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \mathcal{H}$ и $P = \sigma_3 / \mathcal{H}$ – 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.

Начальные и граничные условия для данной задачи:

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

где γ - усредненная плотность вышележащих горных пород; h - глубина разработки; λ - коэффициент бокового распора; $\gamma_{\text{воды}}$ - плотность воды; $\Omega_1(t)$ - изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_2 - внутренний контур; Ω_3 - вертикальные границы внешнего контура; Ω_4 - горизонтальные границы внешнего контура; p_v - давление воздуха в выработке, p_d - детонационное давление; $t_{\text{взр}}$ - момент взрыва; $x_{\text{взр}}$, $y_{\text{взр}}$ - координаты центра взрыва.

Исходя из полученных авторами [6] данных, можно сказать, что детонационное давление для основных ВВ, применяемых на практике, изменяется в пределах $p_d = 1500 \div 24000 \text{ МПа}$.

Чтобы получить решение системы (1) с начальными и граничными условиями (2) 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 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 – $20 \text{ м}^3/\text{т}$, 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 – $R_0 = 0,025 \text{ м}$, длину шпуров будем варьировать в пределах от 1,4 до 5,0 м.

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	$1,25 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$

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

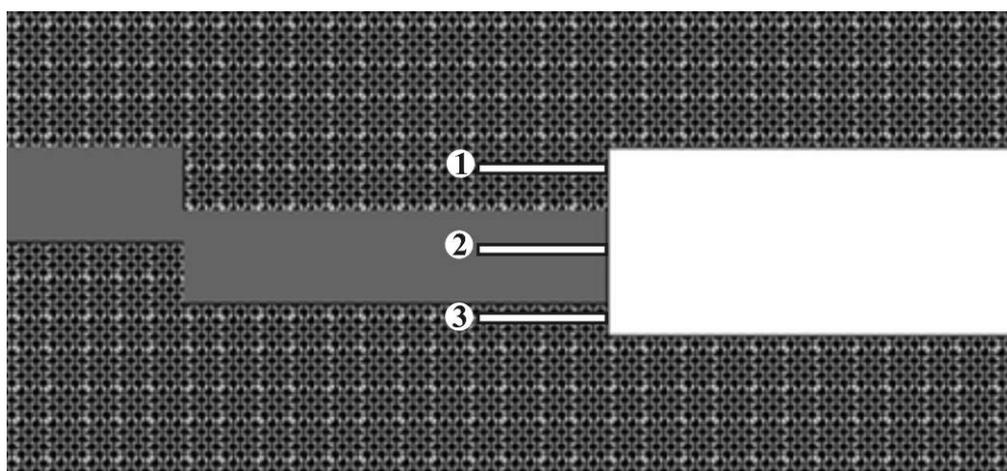
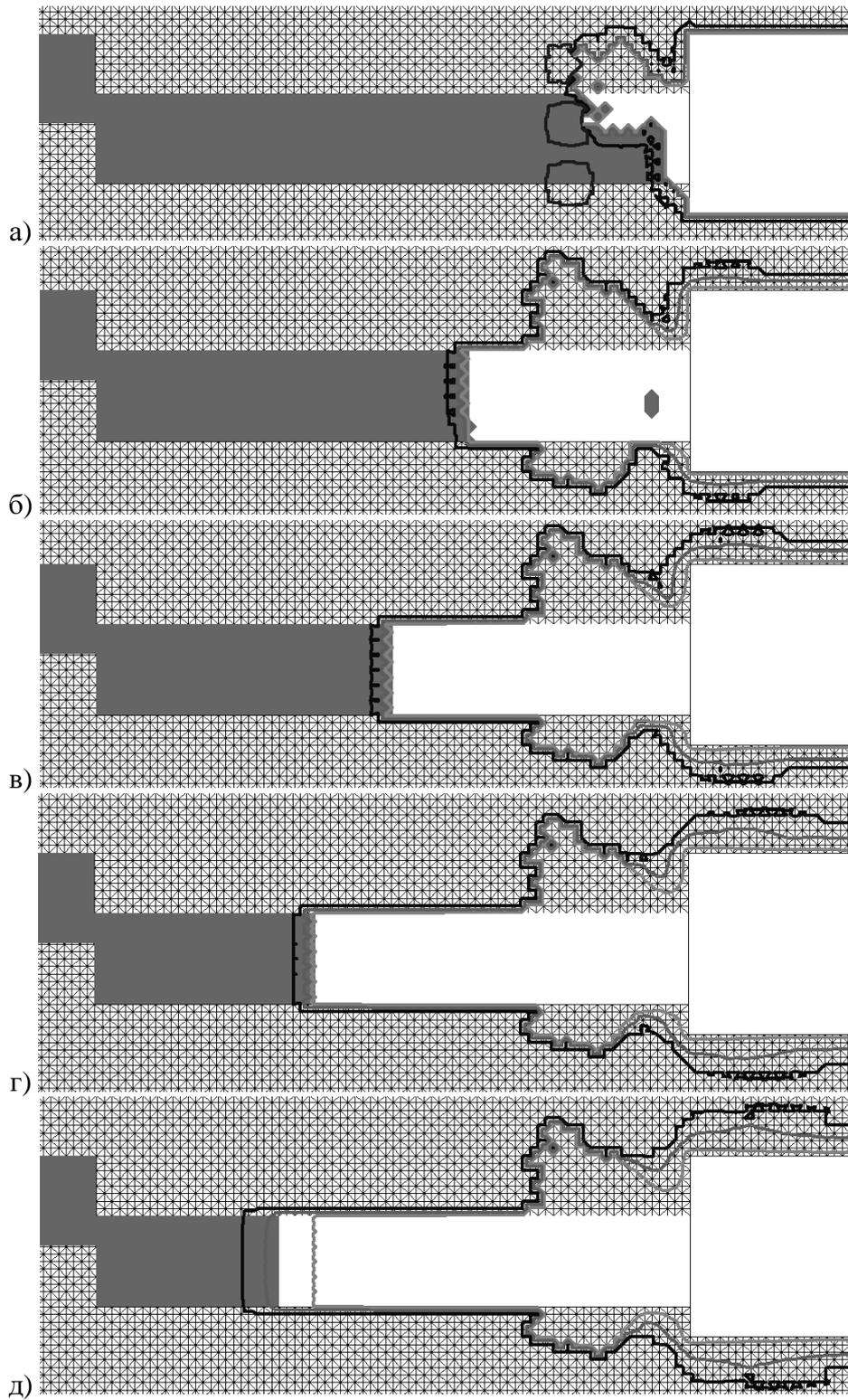


Рис. 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки со шпуров для отбойки угля и породы (1-3)

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. 2. Видно, что в момент взрыва, $t = 0,2$ с, в точках взрывания давление газа высоко, но уже на следующих итерациях зоны повышенного давления исчезают, в местах взрывов образуется полость, сообщающаяся с выработкой, давление газа в ней практически равно атмосферному.

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



$p/p_0 = 0.1$
 $p/p_0 = 0.5$
 $p/p_0 = 0.9$
 $p/p_0 = 1.5$

а) $t = 0,2c$; б) $t = 2c$; в) $t = 4c$; г) $t = 6c$; д) $t = 8c$

Рис. 2 – Относительное давление метана и рост полости выброса, $l_{uu} = 2,0 \text{ м}$

газа, которая исчезает только, когда полость выброса достигает ее границ.

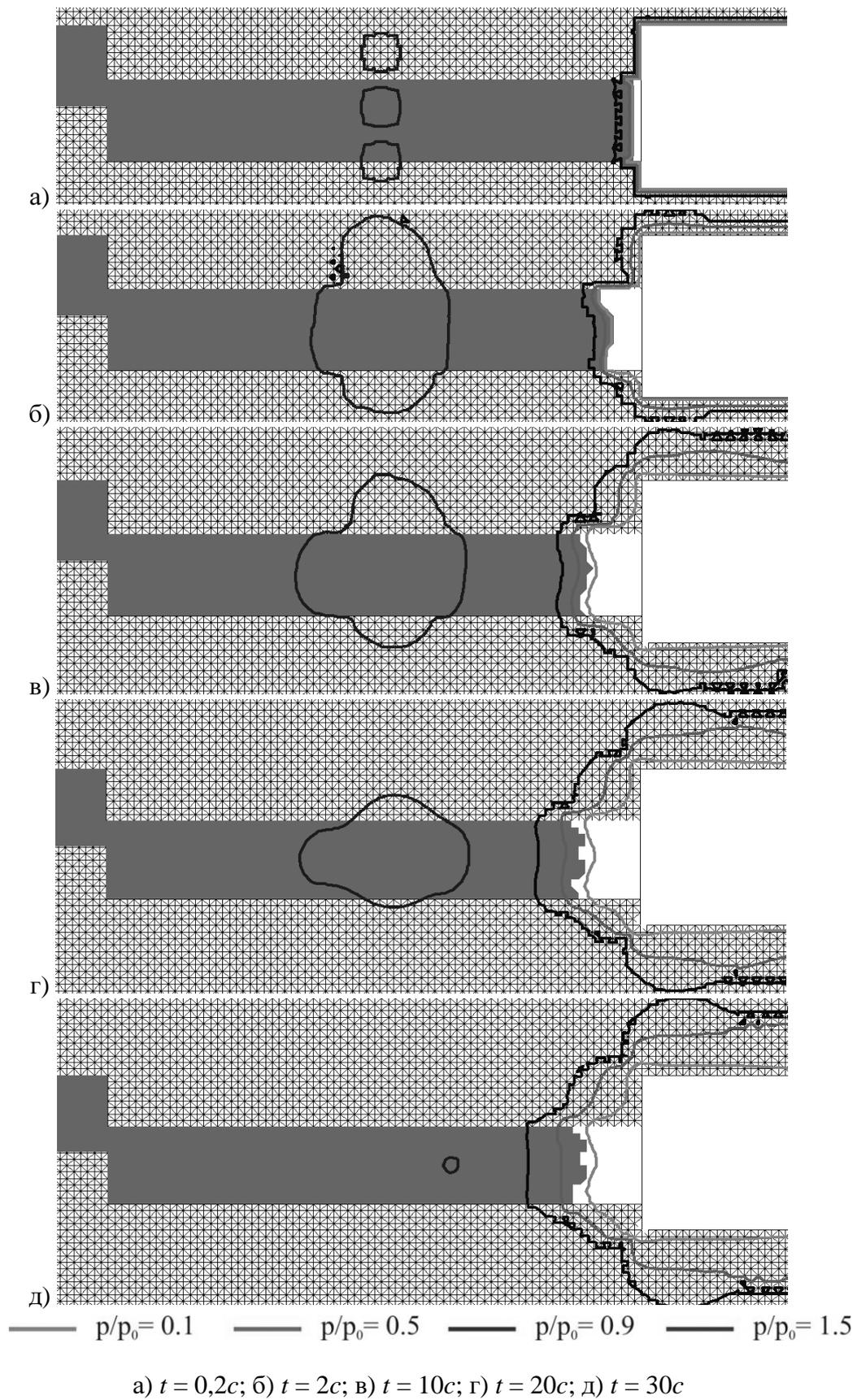


Рис. 4 – Относительное давление метана, $l_{uu} = 5,0 м$

На рис. 4 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.

На рис. 5 показано изменение максимального значения коэффициента проницаемости массива впереди забоя во время протекания динамических процессов в рассмотренных пяти случаях.

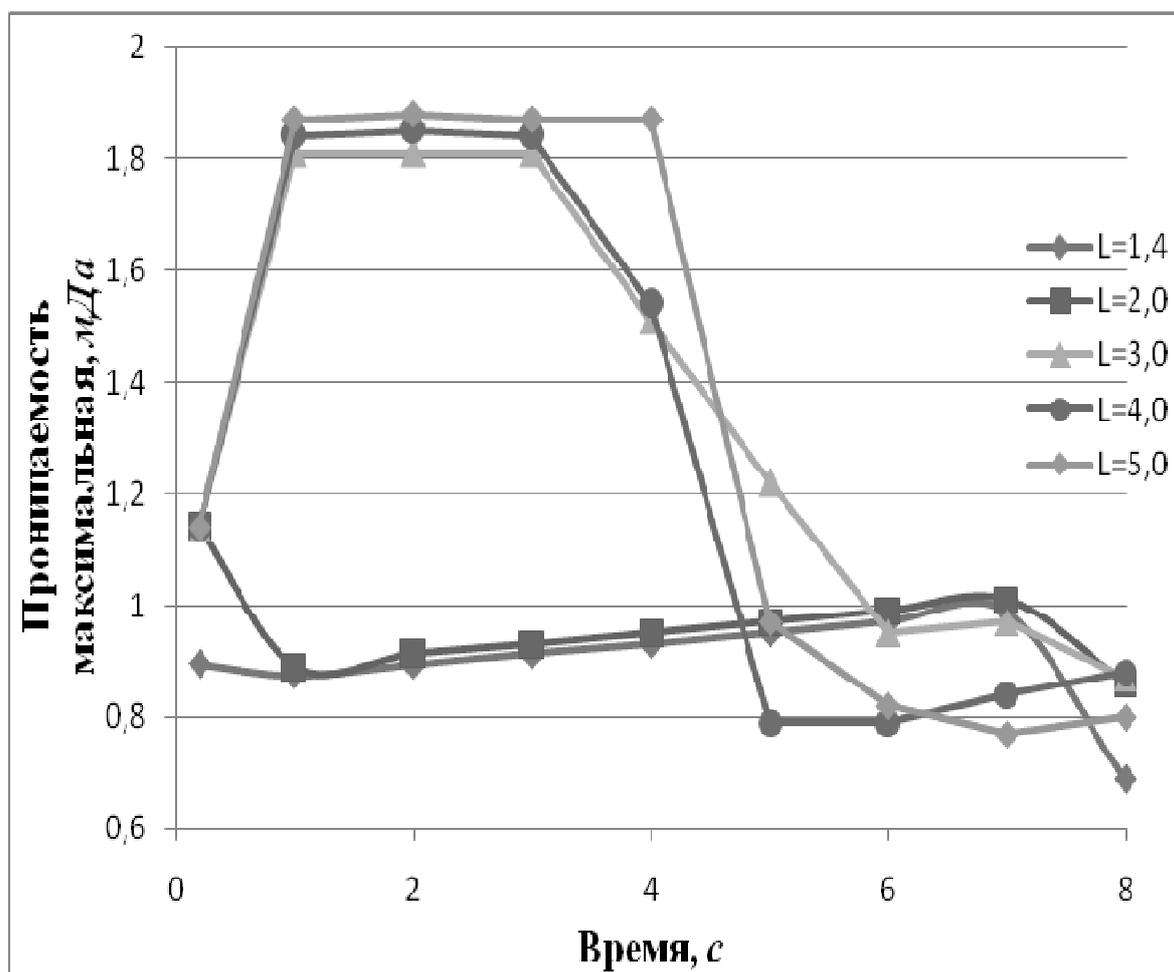


Рис. 5 – Изменение максимального значения коэффициента проницаемости массива впереди забоя

Видно, что увеличение проницаемости во время выброса происходит постепенно, значения коэффициента проницаемости в это время находятся в пределах от 0,8 до 1,0 мДа, рис. 7, L=1,4; L=2,0 м. Если же взрывание шпуровых зарядов не сопровождается выбросом, рис. 4, L=4,0; L=5,0 м, то в течение первых

5 с проницаемость массива принимает максимальные значения в местах взрыва, и эти значения в 2 раза выше, чем в случаях $L=1,4$; $L=2,0$ м.

Рост длины полости выброса показан на графиках, рис. 5. Скорость образования полости в случаях $L=1,4$; $L=2,0$ м составляет 0,86 м/с, в случае $L=3,0$ м – 1,45 м/с.

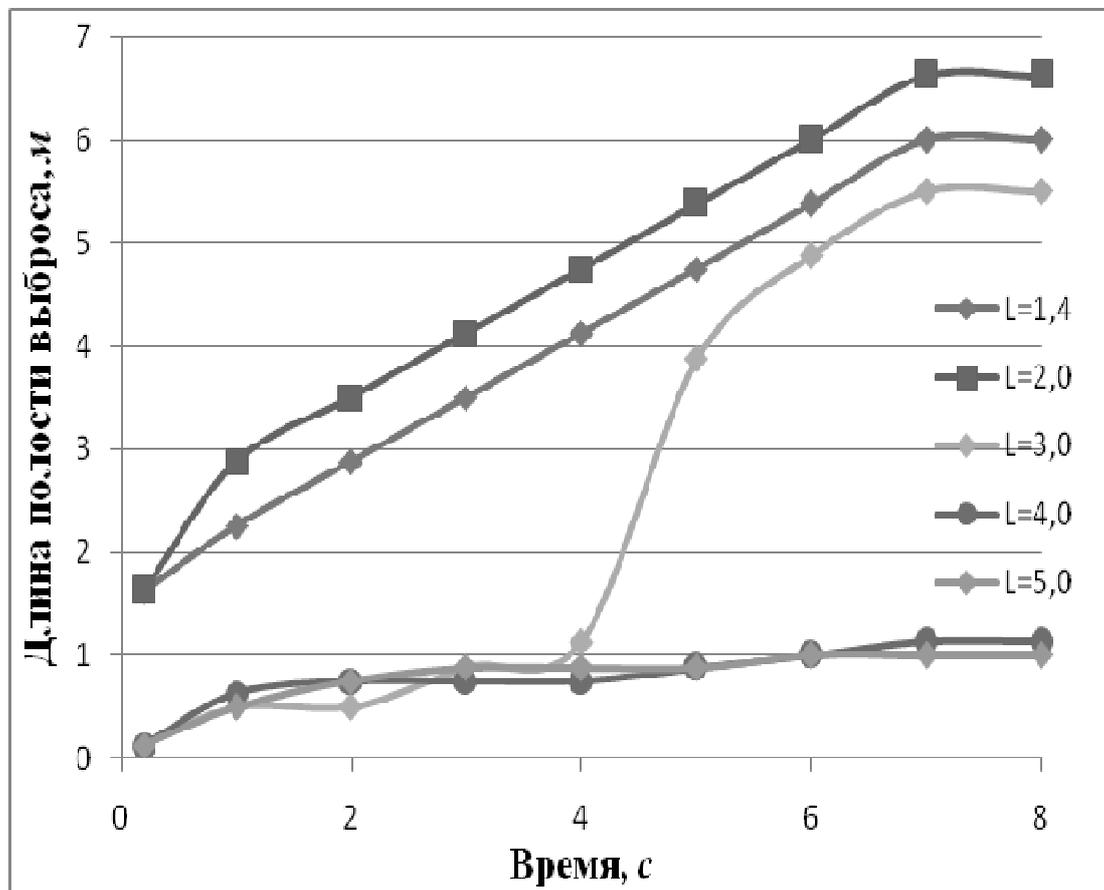


Рис. 5 – Рост длины полости выброса

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. При $l_{ш} < 3,0$ м взрывание шпуровых зарядов сопровождается выбросом, который инициируется в результате суммарного действия растягивающих напряжений, возникающих в призабойной зоне, и отраженной от поверхности волны растяжения от взрыва шпуровых зарядов.

При $l_{ш} = 3,0$ м процесс выброса инициируется с замедлением в 5 с.

При $l_{ш} > 3,0$ м выбросов угля и метана не происходит. При увеличении длины шпуров вероятность возникновения выбросов угля и метана снижается за счет увеличения глубины зоны разгрузки призабойной части угольного пласта.

Увеличение глубины зоны разгрузки призабойной части угольного пласта за счет опережающего взрывного воздействия используется для снижения интен-

сивности и частоты выбросов угля и метана при сотрясательном взрывании во время проведения подготовительных выработок смешанным забоем на особо-выбросоопасных пластах, в зонах геологических нарушений и повышенного горного давления [7]. 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.

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. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
5. 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.
6. Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1979. – 256 с.
7. Инструкция по применению сотрясательного взрывания в угольных шахтах Украины. - Макеевка: МакНИИ, 1994. – 46 с.