

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УГЛЯ И ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ МЕТАНА НА ФРОНТЕ ВЫБРОСА

Виконано чисельне моделювання процесу викиду вугілля та метану у вибої одиночної гірничої виробки. Проаналізовано зміну розподілів коефіцієнту проникності вугілля та параметрів течії метану на фронті викиду.

CHANGE OF COAL PERMEABILITY AND PARAMETERS OF THE METHANE FLOW AT THE OUTBURST FRONT

Numerical modeling of process of coal and methane outburst in a working face of single opening is executed. Change of distributions of coal permeability coefficients and parameters of methane flow at the outburst front is analyzed.

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.

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]:

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

где $\sigma_{ij,j}$ - производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t - время; $X_i(t)$ - внешние силы; $T_i(t)$ - силы, вызванные внутренним трением, $T_i(t) = -c_g \partial u_i / \partial t$; c_g - коэффициент демпфирования, определяемый экспери-

ментально; u_i - перемещения; $P(t)$ - сила давления газа; ρ_n - плотность породы; ρ_g - плотность газа; μ_g - вязкость газа; p - его давление; $q(t)$ - интенсивность источников газовой выработки; 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 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, которое учитывает возможность возникновения разрушения, как в результате сдвига, так и в так и в результате отрыва [3, 4].

Начальные и граничные условия:

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

где 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 (выработка); Ω_3 - вертикальные границы внешнего контура; Ω_4 - горизонтальные границы внешнего контура; p_v - давление воздуха в выработке.

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 [5] 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.

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

Рассмотрим случай, когда забой выработки высотой 3 м находится на расстоянии 7,75 м от тектонического нарушения типа «сброс» с амплитудой смещения 1 м (рис. 1), вокруг которого находится десятиметровая зона перемятого угля. Мощность угольного пласта 1,5 м, глубина проведения выработки – 1200 м. Газоносность угля – $20 \text{ м}^3/\text{т}$, содержание метана в свободной форме – 10 %, в сорбированной – 90 %. Вмещающая порода – аргиллит.

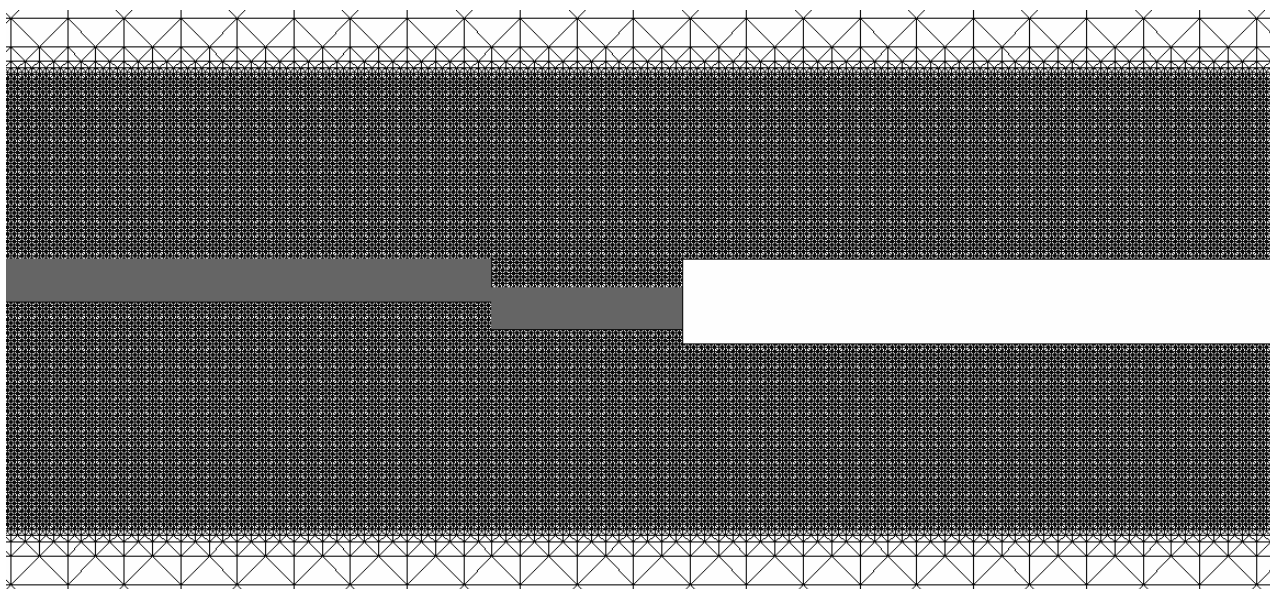


Рис. 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

При выполнении расчета получим распределение геомеханических и фильтрационных параметров в различные моменты времени. На рис. 2 показаны изобары относительного давления метана вокруг выработки и рост полости выброса во время протекания динамических процессов.

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. 2, а-д), длина которой достигает 6,5 м при данных условиях. Затем рост полости останавливается (рис. 2, е), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс течения газа возвращаются к квазистационарному режиму.

Рассмотрим, как изменяется проницаемость угля, рис. 3, давление, рис. 4, расход, рис. 5, и скорость течения метана, рис. 6, на фронте выброса в течение всего процесса.

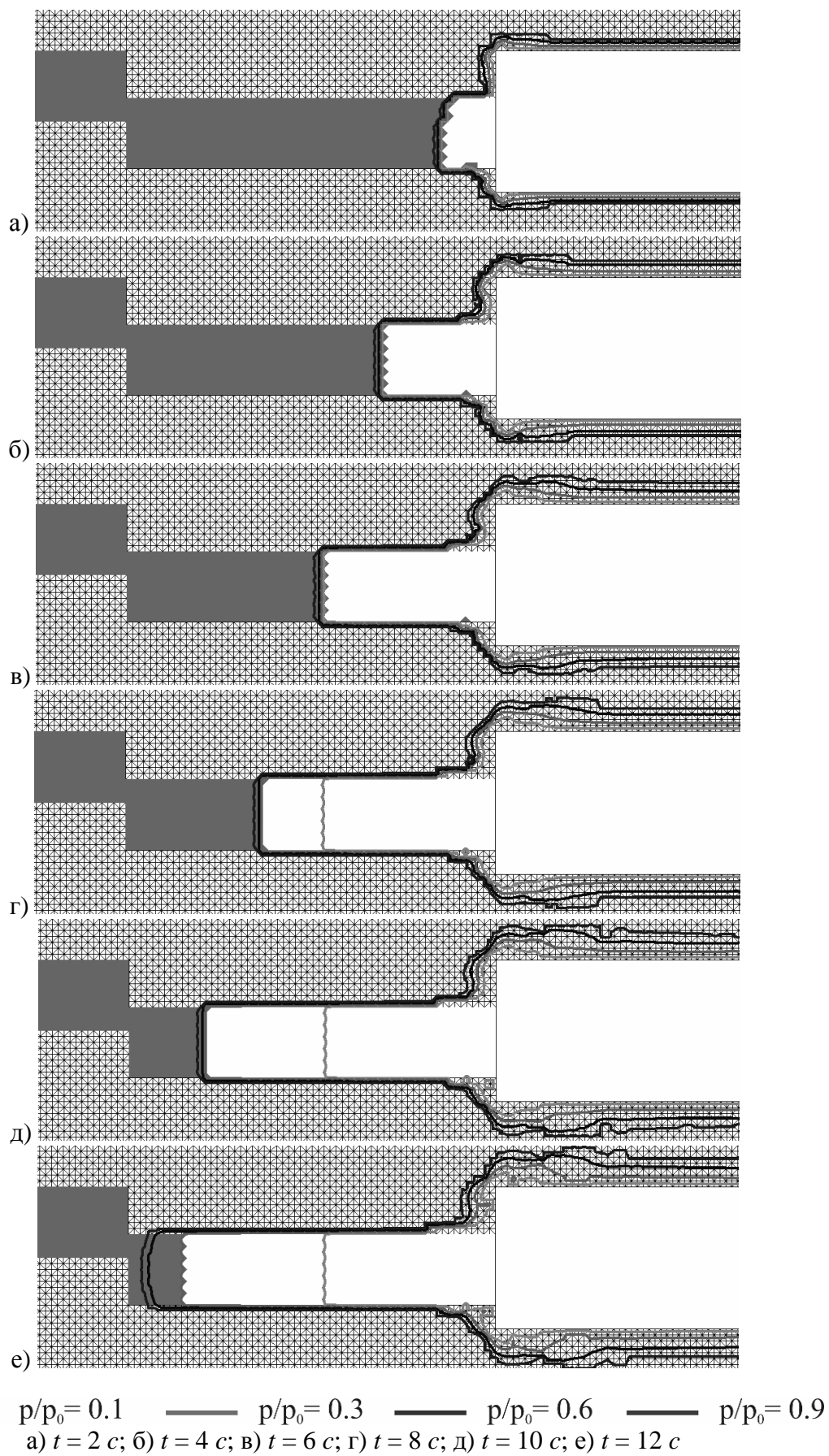


Рис. 2 – Рост длины полости выброса и относительное давление метана (p/p_0)

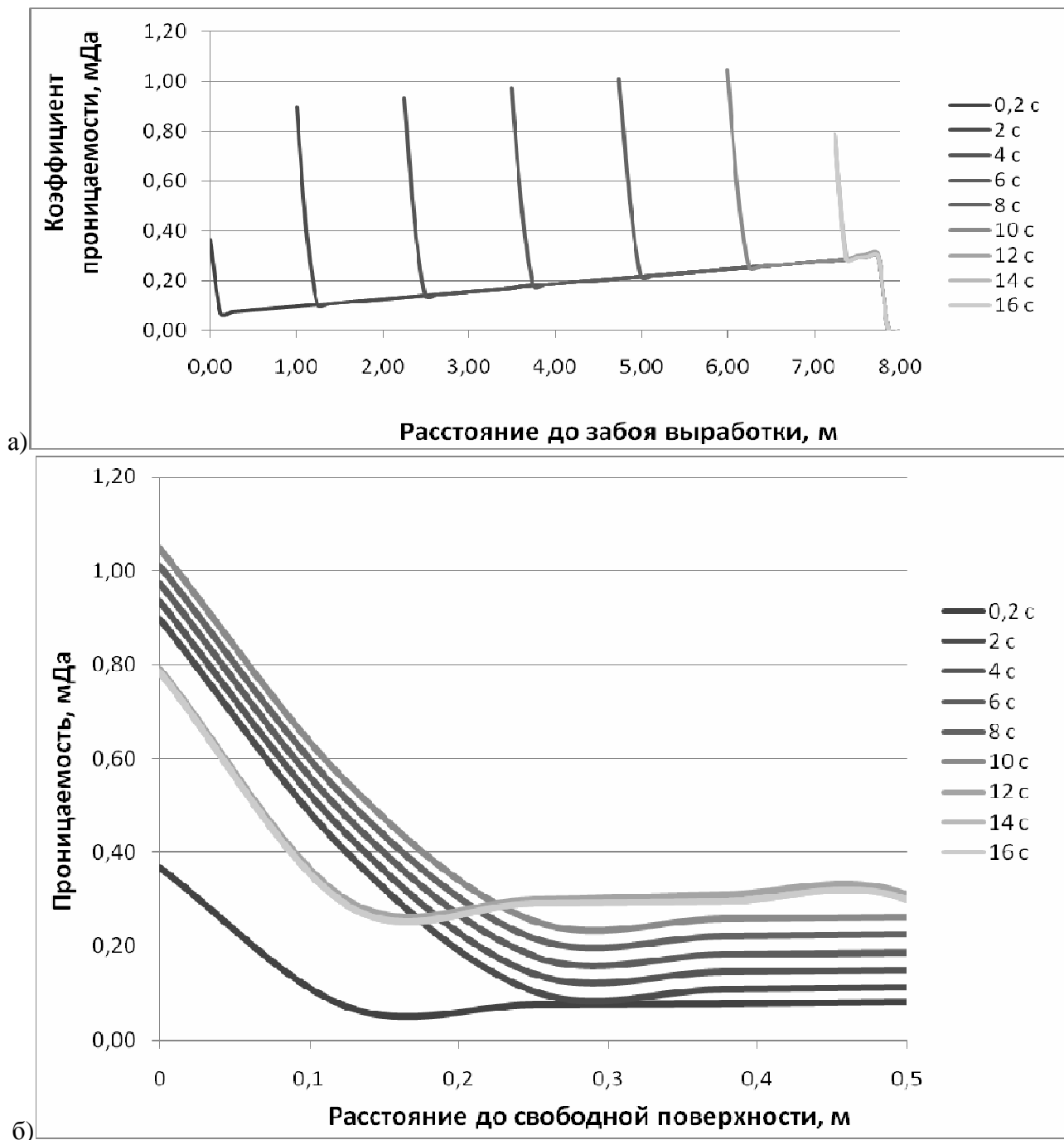


Рис. 3 – Характер изменения проницаемости угля на фронте выброса в различные моменты времени в зависимости от расстояния до а) забоя выработки, б) свободной поверхности фронта выброса

По кривым проницаемости, рис. 3, б, отчетливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования (самая темная кривая, $t = 0,2 \text{ c}$), протекания (кривые $t = 2-10 \text{ c}$) выброса и его затухания (светлые кривые $t > 10 \text{ c}$). Также видно, что значительное – в 5-9 раз – увеличение фоновой проницаемости происходит на расстоянии 0,1-0,3 м от свободной поверхности фронта выброса, что подтверждается данными экспериментальных наблюдений [6].

Давление метана, рис. 4, б, в течение основного времени протекания процесса ($t = 2-10 \text{ c}$) резко падает с 8 МПа в глубине массива до 0,1-2 МПа на свобод-

ной поверхности полости выброса. Причем такое резкое падение давления происходит на расстоянии всего лишь 0,15 м. Это говорит об огромной величине градиентов давления метана на этом промежутке, которые обуславливают развитие скоростей течения метана, достаточных для разрыва расслоившегося угля на мелкие пластинки и выноса их на большие расстояния вглубь выработки.

На стадии затухания кривые давления метана при $t = 12; 14$ и 16 с заметно выполаживаются, величина градиентов давления метана уменьшается на порядок.

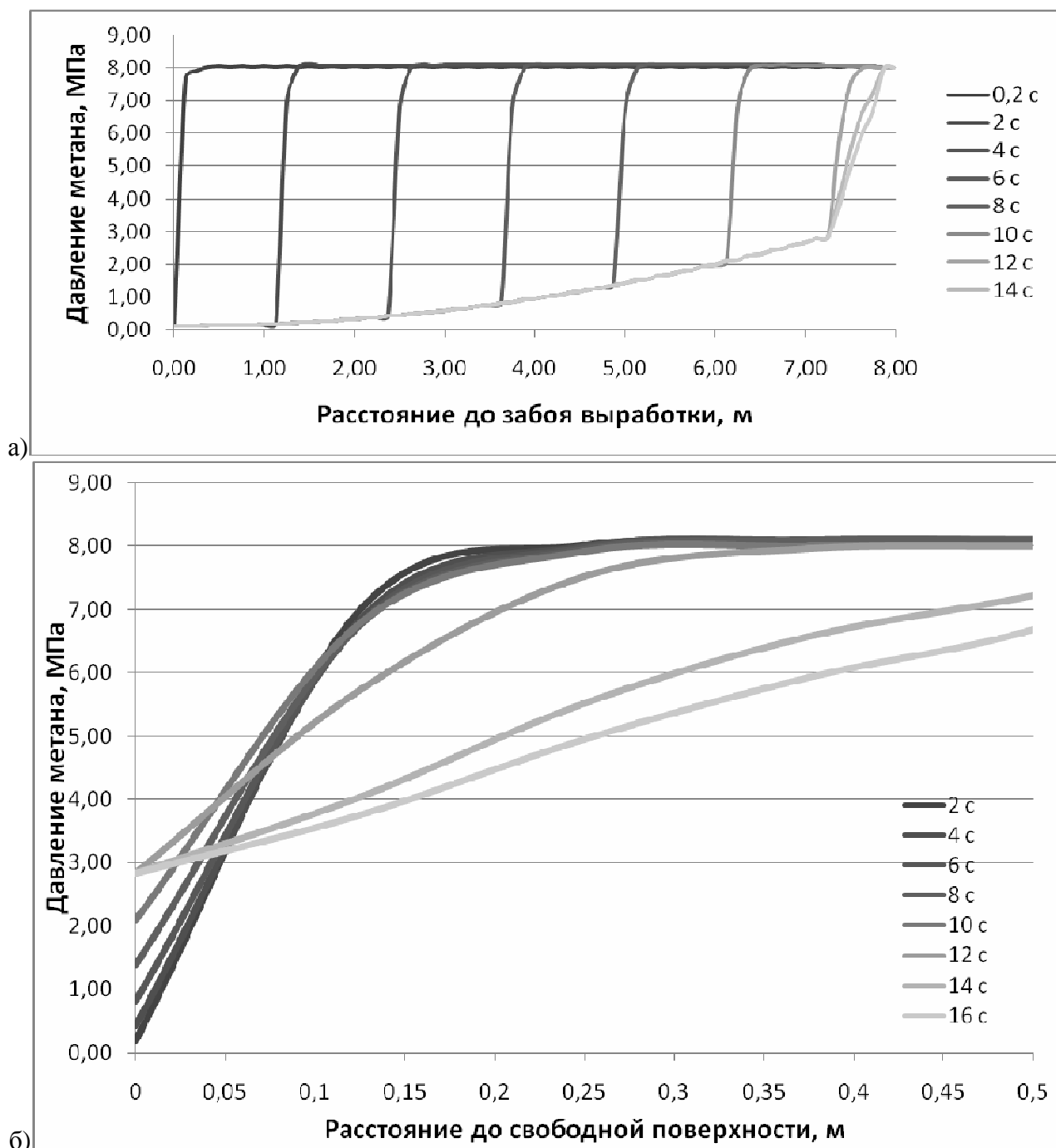


Рис. 4 – Изменение распределения давления метана в зависимости от расстояния до а) забоя выработки, б) свободной поверхности фронта выброса в различные моменты времени

Можно заметить, рис. 4, что давление метано-воздушной смеси внутри полости выброса в течение процесса выброса увеличивается с 0,1 до 3 МПа. Это происходит из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля, временного повышения давления воздуха в самой выработке. Изменение граничных условий – повышение давления метана на контуре полости выброса – является одним из условий затухания процесса выброса угля и газа, что отмечал и автор книги «Динамика выбросов угля, породы и газа» [1] – докт. техн. наук, профессор Шевелев Г.А.

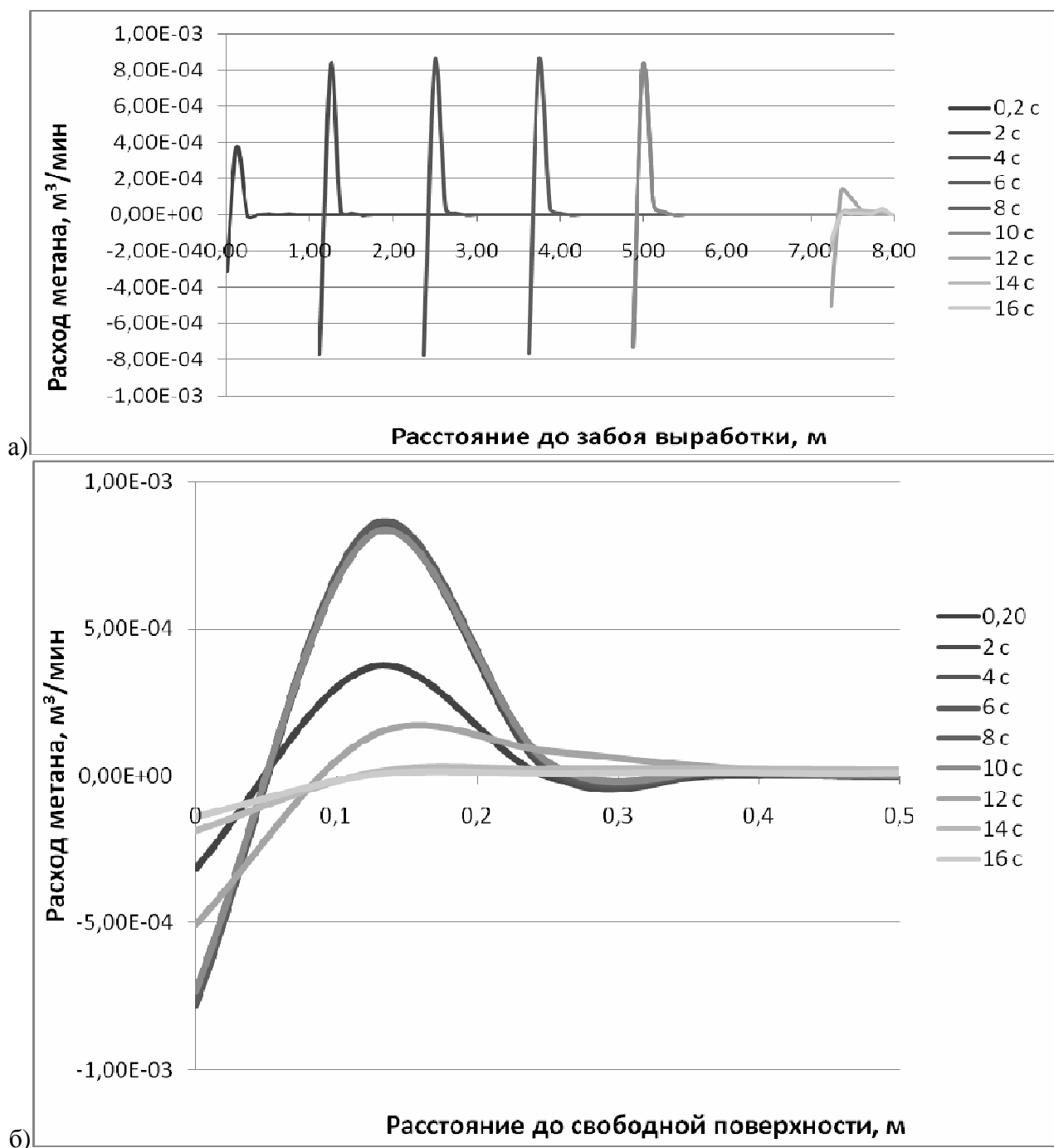


Рис. 5 – Расход метана по центральной оси выработки в зависимости от расстояния до а) забоя выработки, б) свободной поверхности фронта выброса в различные моменты времени

На рис. 5 показаны кривые расходов метана по центральной оси выработки в различные моменты времени. Причем положительные значения расходов означают приток метана за счет его десорбции, отрицательные – выход метана в атмосферу выработки. Как видно из рис. 5, б, основной приток метана в трещинное пространство угля, максимальная интенсификация десорбционных процессов происходит на стадии протекания процесса выброса ($t = 2-10$ с) на расстоянии 0,05-0,25 м от свободной поверхности. В атмосферу выработки максимальное количество метана выделяется в этот же период времени.

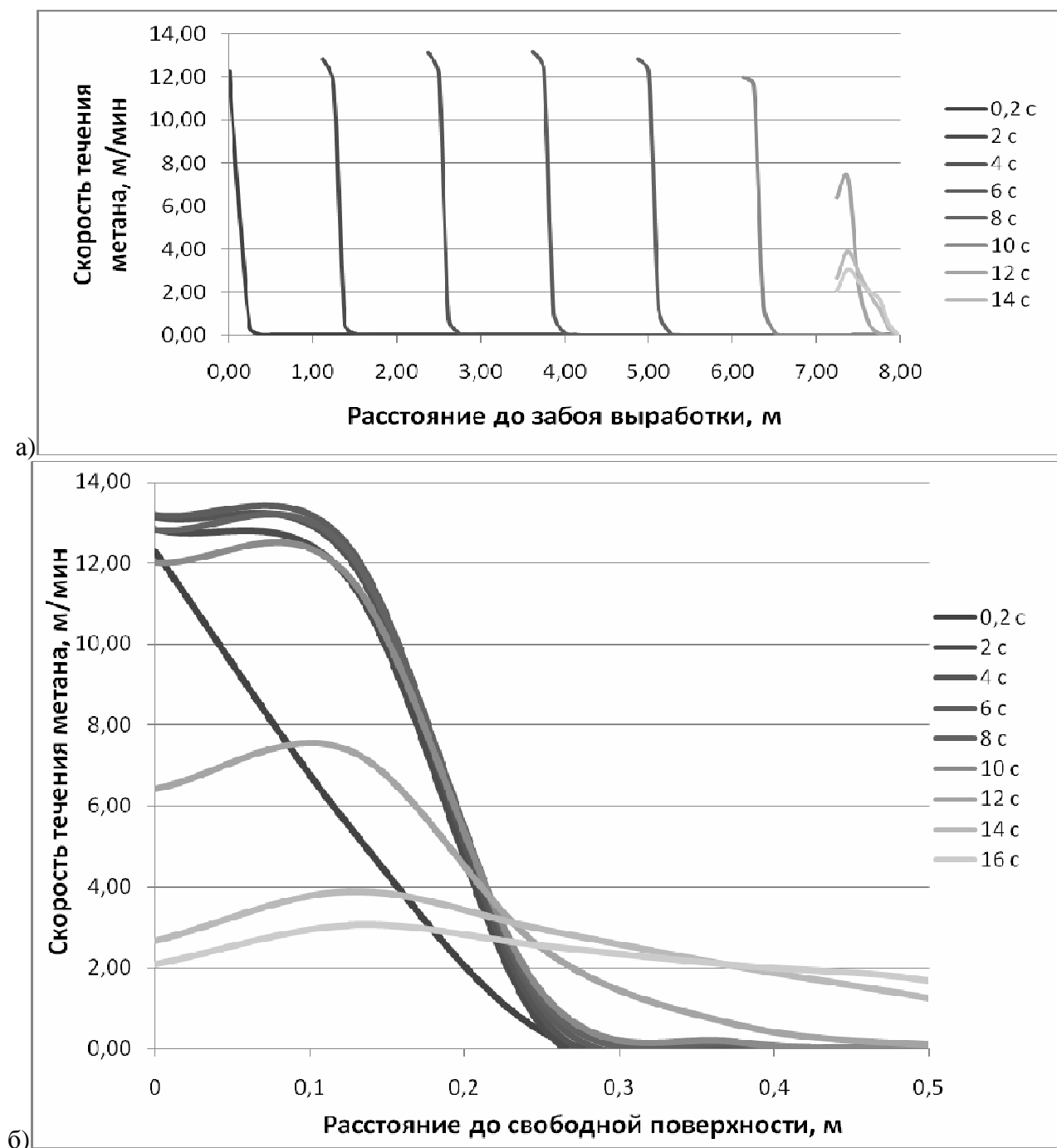


Рис. 6 – Изменение скоростей течения метана в зависимости от расстояния до а) забоя выработки, б) свободной поверхности фронта выброса в различные моменты времени

На рис. 6 показано изменение скоростей течения метана в различные моменты времени. Видно, что при инициировании выброса ($t < 2$ с) происходит рост скоростей фильтрации, угол наклона кривых увеличивается и достигает максимума на протяжении основной стадии процесса (кривые $t = 2-10$ с), на расстоянии 0,1-0,25 м от поверхности полости выброса. На этапе затухания угол наклона кривых резко уменьшается, максимальная скорость течения метана на фронте выброса уменьшается в 6-7 раз.

Выводы. В результате анализа результатов численного моделирования процесса выброса угля и метана в забое одиночной выработки показано, что

- отчетливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования, протекания выброса и его затухания;

- значительное увеличение фоновой проницаемости происходит на расстоянии 0,1-0,3 м от свободной поверхности фронта выброса;

- 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 почти до 3 МПа из-за частичного или полного перекрытия поперечного сечения выработки массой разрушенного угля и временного повышения давления воздуха в самой выработке;

- основной приток метана в трещинное пространство угля, максимальная интенсификация десорбционных процессов происходит на стадии протекания процесса выброса на расстоянии 0,05-0,25 м от свободной поверхности, в атмосферу выработки максимальное количество метана выделяется в этот же период времени;

- при инициировании выброса ($t < 2$ с) происходит рост скоростей фильтрации, угол наклона кривых увеличивается и достигает максимума на протяжении основной стадии процесса на расстоянии 0,1-0,25 м от поверхности полости выброса; на этапе затухания угол наклона кривых резко уменьшается, максимальная скорость течения метана на фронте выброса уменьшается в 6-7 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа. – К: Наук. думка, 1989. – 160 с.
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: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2008. – С. 152-154.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
4. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 648 с.
5. Круковская В.В. Решение объемной задачи нестационарной фильтрации метана из угольного пласта в выработку методом конечных элементов. // Геотехническая механика: Сб. научн. тр./НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2007. - № 69. – С. 240-248.
6. Трифонова Н.В. О закономерностях изменения газодинамических параметров зоны разрушения в процессе выброса. // Выбросы угля, породы и газа: Сб. научн. тр. /НАН Украины ИГТМ. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 60-64.