

УДК 622.831.322:551.243:533.15

Круковская В.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ВНЕДРЕНИЯ В ВЫБРОСООПАСНУЮ ЗОНУ НА
ПРОТЕКАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВБЛИЗИ
ТЕКТОНИЧЕСКОГО НАРУШЕНИЯ**

Круковська В.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ НАН України)

**ВПЛИВ ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ У ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНУ ЗОНУ
НА ПЕРЕБІГ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПОБЛИЗУ
ТЕКТОНІЧНОГО ПОРУШЕННЯ**

Krukovskaya V.V., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM of the NAS of Ukraine)

**INFLUENCE OF PENETRATION DEPTH IN OUTBURST DANGER ZONE
ON THE GAS-DYNAMIC PROCESSES NEAR TECTONIC
DISPLACEMENT**

Аннотация. Анализ геологических условий протекания внезапных выбросов угля и газа в Центральном и других районах Донбасса показывает, что большинство выбросов произошло в тектонически нарушенных зонах, когда выброс инициируется при внедрении в потенциально выбросоопасный участок. С целью установить влияние глубины внедрения в выбросоопасную зону на развитие процесса выброса угля и метана проведена серия численных экспериментов. При этом использовалась математическая модель связанных нестационарных процессов изменения поля напряжений, фильтрации и десорбции метана. Показано, что геомеханические и фильтрационные процессы переходят из квазистационарного режима в динамический только внутри выбросоопасной зоны. Проницаемость угля и скорость фильтрации метана здесь резко возрастают, градиенты давления метана принимают очень высокие значения. Приведены кривые изменения фильтрационных показателей для различных значений глубины проникновения в выбросоопасную зону, в различные моменты времени. Показано, что волна разрушения опережает волну падения давления на 0,09 м для принятых условий моделирования.

Ключевые слова: выброс угля и газа, численное моделирование, тектонические нарушения.

Введение. Анализ геологических условий протекания внезапных выбросов угля и газа в Центральном и других районах Донбасса показывает, что большинство выбросов произошло в тектонически нарушенных зонах пликативного характера и мелких надвигах [1-6]. В целом по угледобывающим странам мира также большая часть выбросов происходит в зонах тектонических нарушений [7], табл. 1.

Тектоника угольных пластов является первопричиной возникновения особых физико-механических свойств угля (пониженная прочность, малая газопроницаемость, повышенная газоотдача).

Таблица 1 – Количество выбросов в зонах геологических нарушений [7]

№	Страна	Количество выбросов в зонах геологических нарушений, %
1.	Страны бывшего СССР	80-90
2.	Китай	более 67
3.	Испания	60-65
4.	Япония	70
5.	Чехия	70
6.	Германия	75

Поэтому эти участки характеризуются склонностью к внезапным выбросам при их вскрытии горной выработкой.

Николин В.И. [8] отмечал, что «возникновение выброса определяется ... глубиной проникновения в выбросоопасный массив. Зарождение выброса возможно только при внедрении в потенциально выбросоопасный участок». Проведем серию численных экспериментов с целью установить влияние глубины внедрения в выбросоопасную зону (в данном случае – зону тектонически препарированного угля в окрестности дизъюнктивного нарушения) на развитие процесса выброса угля и метана.

Особенности математического моделирования газодинамических процессов в зоне влияния тектонических нарушений. В окрестности тектонических нарушений уголь перемят, на 10-20 м от нарушения имеет начальную проницаемость. В результате проведения горной выработки перераспределяется поле начальных напряжений, во вмещающем массиве формируются системы трещин. На поле начальной, тектонической, проницаемости $K_{\text{тект}}$ накладывается поле технологической проницаемости $K_{\text{техн}}$ [9], которая определенным образом зависит от компонент тензора напряжений:

$$K = K_{\text{тект}}(x, y) + K_{\text{техн}}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3),$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – компоненты тензора главных напряжений, МПа.

Система уравнений, описывающая нестационарное поведение двухфазной среды «трещиновато-пористое твердое тело – газ» в тектонически нарушенной зоне, выглядит следующим образом [9]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + T_i(t) + P_i(t) = \rho_s \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t);$$

$$k = k_{\text{техн}} + k_{\text{тект}},$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, МПа; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема тела, Н/м³; $T_i(t)$ – проекции сил, вызванных внутренним трением, действующих на единицу объема тела, Н/м³; $P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением флюидов в трещинно-поровом пространстве, Н/м³; ρ_s – плотность породы, кг/м³; u_i – перемещения, м; t – время, с; p – давление газа, МПа; k_x, k_y – коэффициенты проницаемости в направлении осей x и y , мДа; $q(t)$ – функция газовыделения.

$k_{техн}$ определяется из соотношений:

- в нетронутом горном массиве $k = 0$ при $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_2) / \gamma H < 0,6$, где γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина проведения выработки, м;

- в зоне упругих деформаций и равнокомпонентного сжатия $k = 0$ при $Q^* < 0,7$; $P^* = \sigma_3 / \gamma H > 0,25$;

- в области начального трещинообразования отдельные трещины не связаны друг с другом, при $0,7 < Q^* < 0,8$ $k = k_{\min}$;

- в области интенсивного трещинообразования имеет место неуправляемый рост трещин, на данной стадии быстро увеличиваются деформации за счет распространения трещин и разрыхления [10]. В области интенсивного трещинообразования происходит рост коэффициента проницаемости на 2-3 порядка в различных породах и материалах. В этой зоне при $Q^* > 0,8$ $k = e^{0,26Q^* - 4,65}$;

- в области разрушения горных пород $k = k_{\max}$, при $P^* < 0,1$; $Q^* > 0,8$.

Задача решается в упруго-пластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения в результате как сдвига, так и отрыва.

Начальные условия для данной задачи запишем в виде:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H;$$

$$\sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H;$$

$$p|_{t=0} = p_0.$$

Граничные условия:

$$p|_{\Omega_1(t)} = p_0;$$

$$p|_{\Omega_2} = 0,1 \text{ МПа};$$

$$k_{\text{тект}} = f(x, y);$$

$$u_x|_{\Omega_3} = 0;$$

$$u_y|_{\Omega_4} = 0,$$

где $\Omega_1(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_2 – внутренний контур (выработка); Ω_3 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_4 – горизонтальные границы внешнего контура.

Условиями образования полости разрушения будем считать:

1) принадлежность конечного элемента области неупругих деформаций, вызванных растягивающими напряжениями;

2) выполнение критерия превышения градиентами фильтрации метана критического значения $\text{grad } p > C_1$.

Постановка задачи. Рассмотрим случай, когда выработка подходит к сбросу с амплитудой 1 м, по угольному пласту мощностью 1,5 м, на глубине 1200 м. Газоносность угля – 20 м³/т, содержание метана в свободной форме – 10 %. Свойства пород, используемые при расчетах, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Свойства вмещающих пород

Порода	Модуль упругости, Е, МПа	Коэффиц. Пуассона, μ	Сцепление, С, МПа	Угол внутреннего трения, φ , °	Прочность на растяж., σ_p , МПа
Аргиллит	10 ⁴	0,2	3,5	30	2
Уголь	5*10 ³	0,2	1,75	30	1

Будем считать, что тектоническая проницаемость $k_{\text{тект}}$ угольного пласта распространяется по обе стороны от сброса на расстояние 10 м и линейно возрастает по направлению к сбросу.

Расчеты проводились с использованием метода конечных элементов. Шаг по времени – 0,1 с. В результате решения системы матричных уравнений МКЭ получим распределения значений компонент тензора напряжений, проницаемости, давления метана и скорости фильтрации в каждой точке исследуемой области в течение времени моделирования.

Результаты расчетов. Рассмотрим изменение таких параметров, как максимальная скорость течения газа, максимальная проницаемость углепородного массива и длина полости разрушения в зависимости от расстояния L между сбросом и забоем выработки, которое будем изменять в пределах от 15 до 7 м. При $L > 10$ м давление метана в угольном пласте вблизи выработки понижается

медленно (рис. 1), проницаемость приконтурного массива увеличивается равномерно, согласно изменению напряженно-деформированного состояния пород вокруг выработки, образования полости разрушения не происходит. Иными словами, все процессы носят квазистационарный характер, динамических явлений не наблюдается.

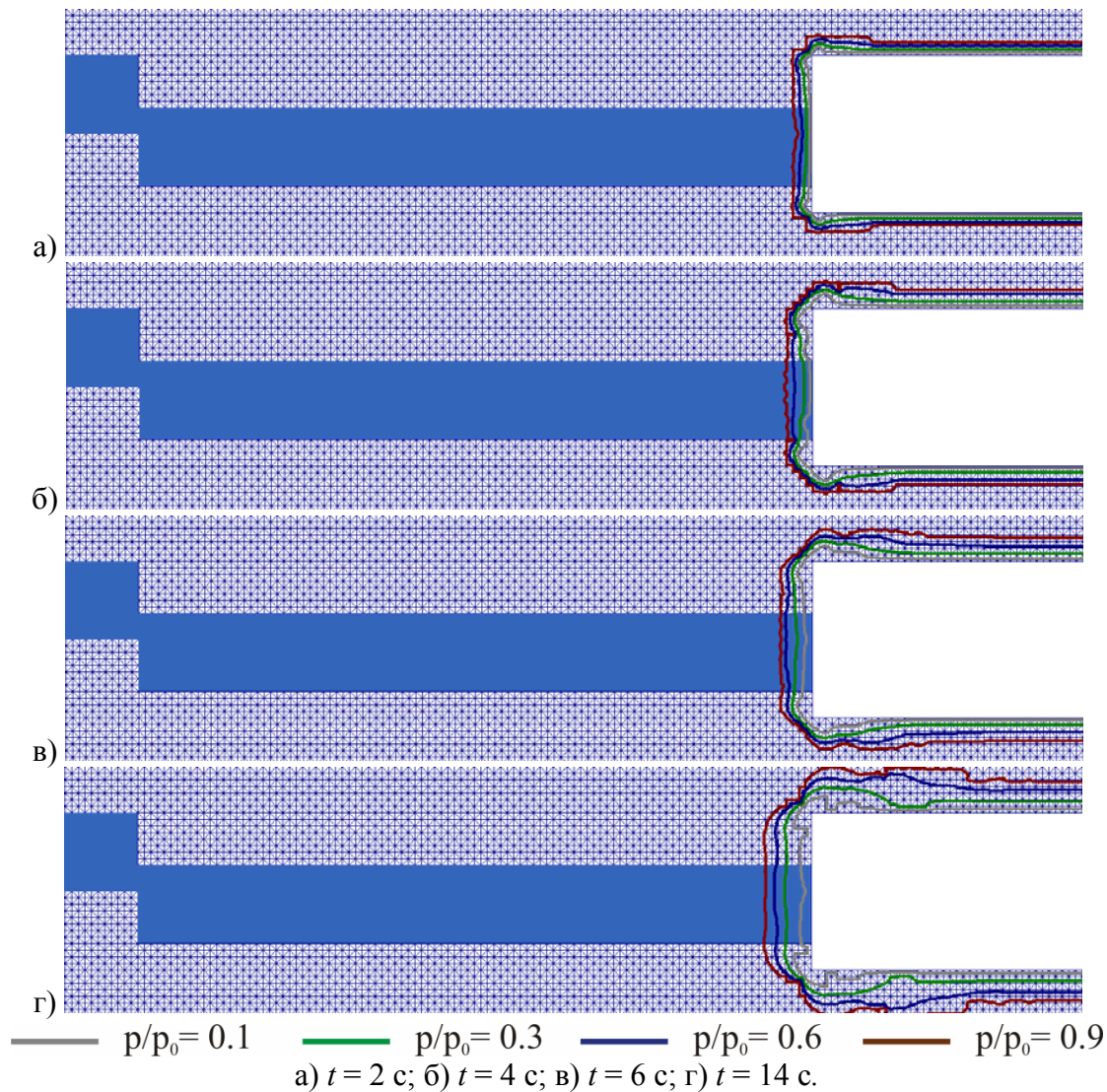


Рисунок 1 – Относительное давление метана (p / p_0) при $L > 10$ м
в различные моменты времени

Если расстояние между сбросом и забоем выработки $L = 10$ м, давление метана в угольном пласте вблизи выработки падает быстро (рис. 2), т.е. градиенты давления принимают высокие значения и скорость течения метана значительно увеличивается, проницаемость угля стремительно растет – происходит вынос угля и образование полости в угольном пласте.

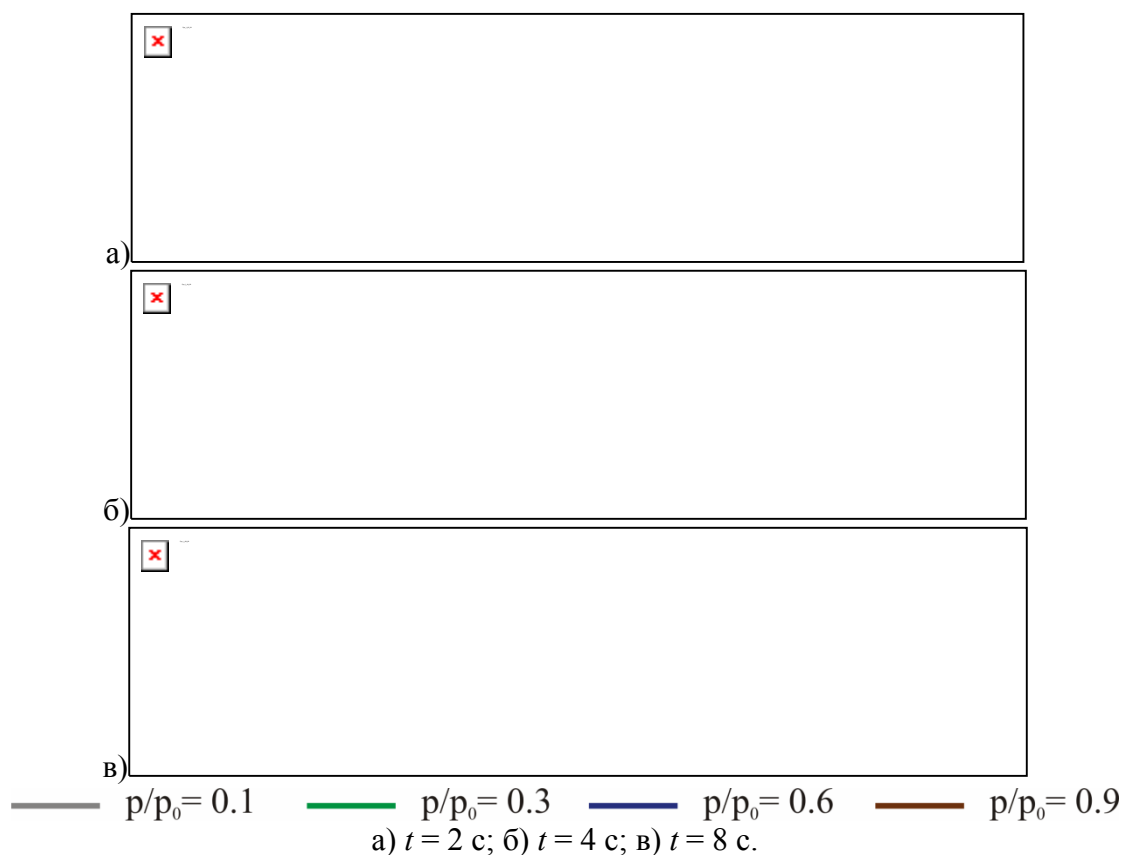
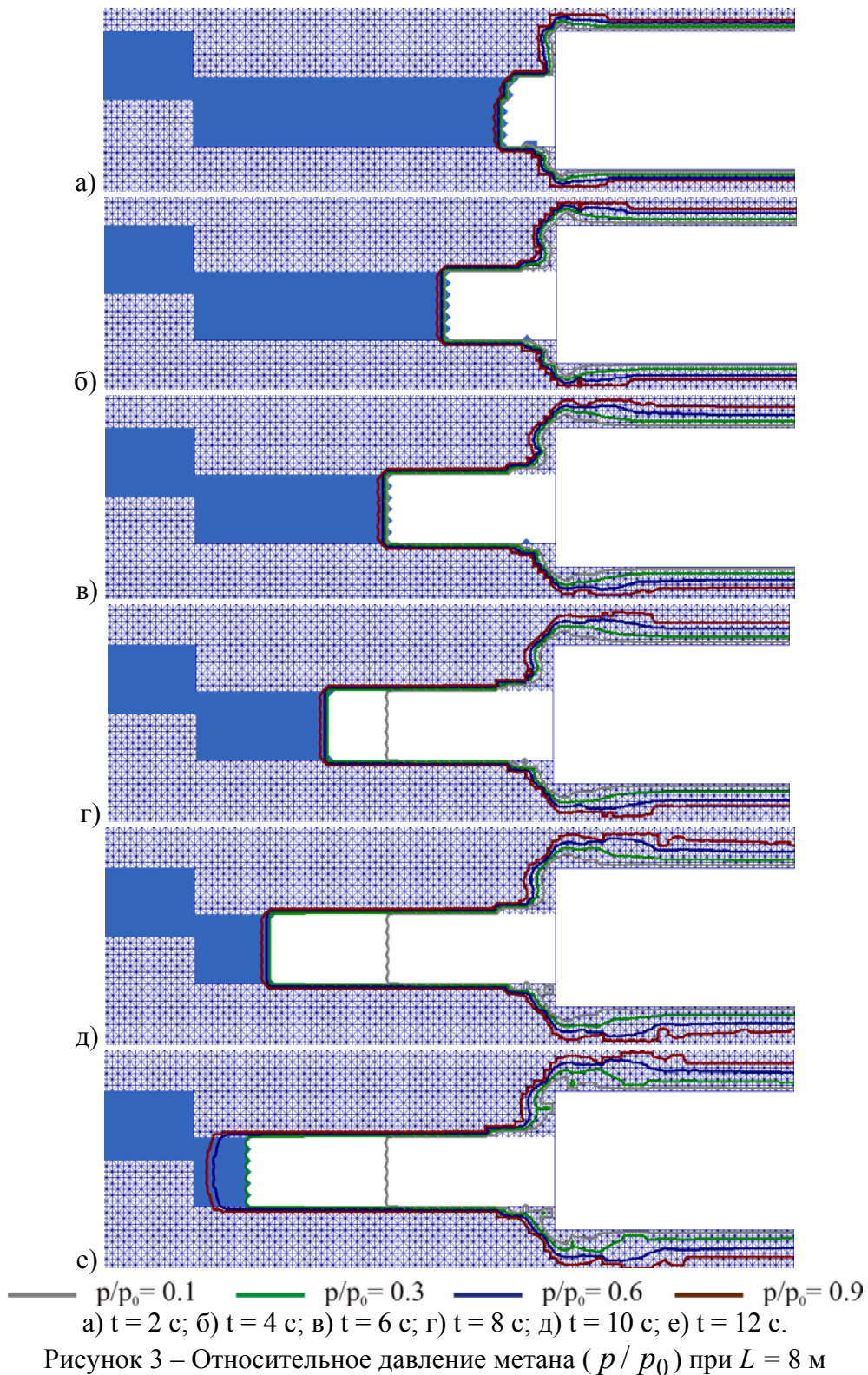


Рисунок 2 – Относительное давление метана (p / p_0) при $L = 10$ м в различные моменты времени

Однако этот процесс быстро заканчивается. Геомеханические и фильтрационные процессы возвращаются к квазистационарному режиму (рис. 2 б, 2 в). В течение первых 4-х секунд происходит газодинамическое явление, которое из-за малости объема высыпавшегося угля, наверное, следует отнести не к выбросу, а к вывалу или высыпанию.

При дальнейшем сокращении расстояния $L < 10$ м, при $L = 9$ м; $L = 8$ м (рис. 3) и $L = 7$ м время протекания динамического процесса увеличивается с 4 до 12 с. В течение этого времени градиенты давления принимают очень высокие значения. Происходит образование полости разрушения в угольном пласте, длина которой достигает 6-7 м при данных условиях моделирования (рис. 3 а-д). Затем рост полости останавливается (рис. 3 е), скорости течения метана падают, давление метана в угольном пласте продолжает медленно снижаться – геомеханические процессы и процесс фильтрации газа возвращаются к квазистационарному режиму.

На рис. 4 показаны графики изменения скоростей фильтрации метана для значений параметра L , равных 7, 8, 9 и 10 м. Хорошо видно, что увеличение скоростей соответствует периодам образования полостей. Рост скоростей фильтрации газа обусловлен высокими градиентами давления метана на фронте разрушения и является причиной расслоения угля и его выноса за пределы полости выброса.



На рис. 5 графически представлены зависимости проницаемости на фронте разрушения от расстояния между сбросом и забоем выработки. Как и следовало ожидать, рост полостей разрушения сопровождается резкое увеличение проницаемости угольного пласта. Увеличение длины полости разрушения для перечисленных выше случаев показано на рис. 6. Можно заметить, что для принятых условий ее длина не превышает 1 м при $L = 10$ м.

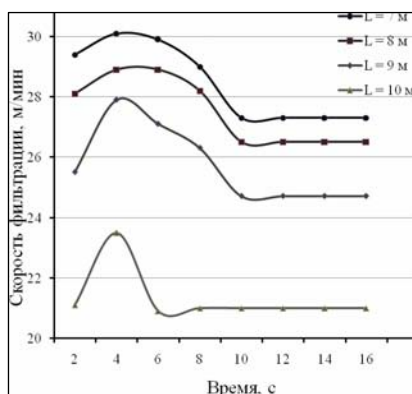


Рисунок 4 – Скорость фильтрации метана V при различных значениях L

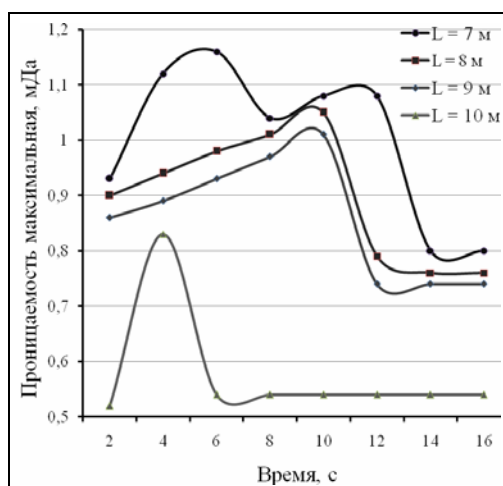


Рисунок 5 – Изменение проницаемости при различных значениях L

Для значений параметра L , равных 7, 8 и 9 м, кривые роста длины полости разрушения практически совпадают.

Проанализируем время протекания процессов, представленных на рис. 4-6, табл. 3. Видно, что для случая вывала угля ($L = 10$ м) время формирования полости, роста проницаемости и увеличения градиентов давления метана совпадает. В остальных случаях рост градиентов давления метана заканчивается раньше, чем формирование полости разрушения, а рост проницаемости продолжается еще в течение 2 с после окончания формирования полости.

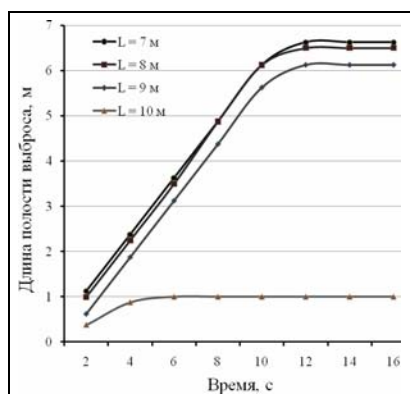
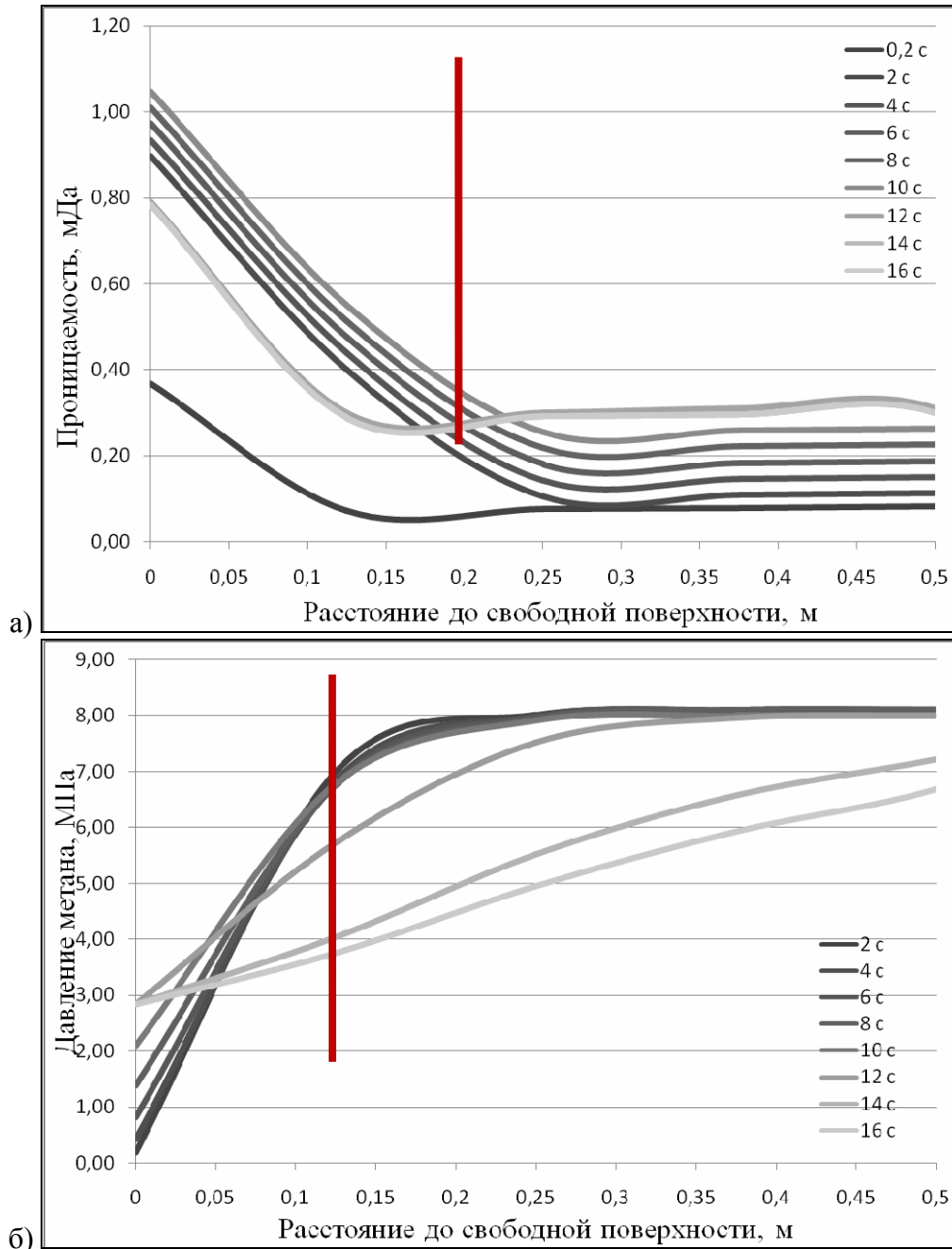


Рисунок 6 – Рост длины полости разрушения при различных значениях L

Таблица 3 – Время протекания динамических процессов

Параметры	Время, с			
	$L = 7$ м	$L = 8$ м	$L = 9$ м	$L = 10$ м
Формирование полости	12	12	12	6
Рост проницаемости	14	14	12	6
Повышение градиентов давления метана	10	10	10	6

Рассмотрим, как изменяется проницаемость угля, рис. 7 а, и давление метана, рис. 7 б, на фронте разрушения во время протекания всего процесса при $L = 8$ м.



а) проницаемость угля; б) давление метана.

Рисунок 7 – Характер изменения фильтрационных параметров на фронте разрушения в различные моменты времени при $L = 8$ м

По кривым проницаемости отчетливо прослеживается деление процесса на стадии инициирования (самая темная кривая, $t = 0,2$ с), протекания (кривые $t = 2-10$ с) газодинамического явления и его затухания (светлые кривые $t > 10$ с). Также видно, что значительное – в 5-9 раз – увеличение проницаемости происходит на расстоянии 0,1-0,3 м от свободной поверхности фронта разрушения. Эти расчетные данные подтверждаются экспериментальными наблюдениями [11]. Автор статьи [11] пишет, что «В период протекания выброса у поверхности обнажения существует и перемещается вместе с ней зона предельного состояния (зона разрушения). В пределах этой зоны система образующихся трещин нормально ориентирована к направлению развития выброса. По данным экспериментальных наблюдений глубина ее составляет 0,3-0,5 м».

Давление метана, рис. 7 б, в течение основного времени протекания процесса ($t = 2-10$ с) резко падает с 8 МПа в глубине массива до 0,1-2 МПа на свободной 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 фильтрации 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.

Если сравнить глубину зоны изменения параметров «проницаемость угля» (рис. 7 а) и «давление метана» (рис. 7 б), то видно, что в первом случае она равна 0,26 м, во втором – 0,17 м. Это говорит о том, что в процессе выброса угля и газа волна разрушения опережает волну падения давления на 0,09 м для данных условий моделирования. Расслоение угольного пласта по инерции продолжается еще некоторое время после завершения процесса выброса.

Выводы. В результате проведения серии вычислительных экспериментов, в которых одиночная горная выработка приближается к месту разрывного тектонического нарушения, окруженного зоной нарушенного угля, показано, что за пределами этой зоны развязывание динамических процессов не происходит, фильтрация метана протекает в квазистационарном режиме.

На границе зоны тектонической проницаемости может произойти вывал небольшого количества угля. Если же процесс выброса угля и газа иницируется внутри этой области, резко возрастают проницаемость угля и скорости фильтрации метана на фронте разрушения – геомеханические и фильтрационные процессы переходят из квазистационарного режима в динамический.

В процессе выброса угля и газа волна разрушения опережает волну падения давления на 0,09 м для данных условий моделирования. Расслоение угольного пласта по инерции продолжается еще некоторое время после завершения процесса выброса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тектоника и горно-геологические условия разработки угольных месторождений Донбасса / В.Е. Забигаило, В.В. Лукинов, Л.И. Пимоненко, Н.В. Сахневич. – К: Наукова думка, 1994. – 152 с.

2. Анциферов, А.В. Новый подход к проблеме внезапных выбросов / А.В. Анциферов, А.А. Голубев / Уголь Украины. – 2006. – № 5. – С. 34-37.
3. Doyle, R. Geological Structures in Relation to Outburst Events / R. Doyle // Coal Operators' Conference: Materials of the International Conference. – Aziz: University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2002. – P. 53-59.
4. Choi, X. Study of the Mechanisms of Coal and Gas Outbursts Using a New Numerical Modeling Approach / X. Choi, M. Wold // Coal Operators' Conference: Materials of the International Conference. – Aziz: University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004. – P. 181-194.
5. Зыков, В.С. Техногенная геодинамика / В.С. Зыков. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2006. – 266 с.
6. Пимоненко, Л.І. Викидонебезпечність і порушеність основних робочих пластів Тяглівського і Любельського родовищ Львівсько-Волинського басейну на основі тектонічного фактору / Л.І. Пимоненко, П.М. Явний, С.П. Мельничук // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – № 80. – С.179-185.
7. Формирование выбросоопасных зон в угленосном массиве и способы предотвращения выбросоопасности на шахтах / А.И. Жаров, Н.Н. Красюк, А.В. Ремезов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2006. – 92 с.
8. Николин, В.И. Борьба с выбросами угля и газа в шахтах / В.И. Николин, И.И. Балинченко, А.А. Симонов. – М.: Недра, 1981. – 300 с.
9. Лукинов, В.В. Моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений / В.В. Лукинов, А.П. Круковский, В.В. Круковская // Форум гірників-2007: Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. – С. 63-69.
10. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
11. Трифонова, Н.В. О закономерностях изменения газодинамических параметров зоны разрушения в процессе выброса / Н.В. Трифонова // Выбросы угля, породы и газа. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 60-64.

REFERENCES

1. Zabygaylo, V.Ye., Lukynov, V.V., Pymonenko, L.I. and Sakhnevych, N.V. (1994), *Tektonika i gorno-geologicheskkiye usloviya razrabotki ugolnikh mestorozhdeniy Donbassa* [Tectonics and mine-geological terms of development of coal deposits of Donbassa], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Antsyferov, A.V. and Golubev, A.A. (2006), «New approach to the problem of the sudden troop landings», *Coal of Ukraine*, no. 5. – pp. 34-37.
3. Doyle R. (2002), «Geological Structures in Relation to Outburst Events», *Coal Operators' Conference: Materials of the International Conference. – Aziz: University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 53-59.
4. Choi X. (2004), «Study of the Mechanisms of Coal and Gas Outbursts Using and New Numerical Modeling Approach», *Coal Operators' Conference: Materials of the International Conference. – Aziz: University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 181-194.
5. Zыkov, V.S. (2006), *Tekhnogennaya geodynamyka* [Technogenical geodynamics], GU KuzGTU, Kemerovo, RU.
6. Pymonenko L.I., Yavnyy, P.M. and Melnigchuk, S.P. (2008), «Coal-and-gas outburst-danger and violation of basic working layers of Tyagljvsky and Lyubelsky deposits of Lvov-Volynsky basin on the foundation of techtonscal factor», *Geotechnical mechanics*, no. 80, pp.179-185.
7. Zharov, A.I., Krasyyuk, N.N. and Remezov, A.V. (2006), *Formirovaniye vybrosopasnikh zon v ugleporodnom massive I sposoby predotvrashcheniya vybrosopasnosti na shakhtakh* [Forming of coal-and-gas outburst-dangerous zones in a coal-rock array and methods of prevention of coal-and-gas outburst-danger on mine], Kuzbassvuzyzdat, Kemerovo, RU.
8. Nykolyn, V.I., Balynchenko, I.I. and Symonov, A.A. (1981), *Borba s vnezapnimi vybrosami ugla i gaza v shakhtakh* [Fight against the troop landings of coal and gas in mines], Nedra, Moscow, SU.
9. Lukynov, V.V., A.П. Круковский, and Круковская, V.V. (2007), «Design of process of the troop landing of coal and methane near the tectonic violations», *Forum girnykiv-2007: Mamerialy mizhнародnoi konferencii. – Dnipropetrovsk: Natsionalny girnychy universytet*, pp. 63-69.
10. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomekhanika upravleniya sostoyaniyem massiva vblizi gornikh vyrabotok* [Geomechanical of control by the state of array near the main warkings], Naukova dumka, Kiev, UA.
11. Triphonova, N.V. (1976), «About conformities to the law of change of gas-dynamical parameters of

area of destruction in the process of the troop landing», // *Outbursts of coal, breed and gas*, Naukova dumka, pp. 60-64.

Об авторе

Круковская Виктория Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtm@ukr.net.

About the author

Krukovskaya Victoriya Victorovna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtm@ukr.net.

Анотація. Аналіз геологічних умов перебігу раптових викидів вугілля і газу в Центральному та інших районах Донбасу свідчить, що більшість викидів відбувалась в тектонічно порушених зонах, коли викид ініціюється при проникненні в потенційно викидонебезпечну ділянку. С метою встановлення впливу глибини проникнення у викидонебезпечну зону на розвиток процесу викиду вугілля і метану проведено серію чисельних експериментів. При цьому використовувалась математична модель зв'язаних нестационарних процесів зміни поля напружень, фільтрації та десорбції метану. Показано, що геомеханічні і фільтраційні процеси переходять із квазістационарного режиму у динамічний тільки всередині викидонебезпечної зони. Проникність вугілля та швидкість фільтрації метану тут різко зростає, градієнти тиску метану приймають дуже високі значення. Наведено криві зміни фільтраційних показників для різних значень глибини проникнення у викидонебезпечну зону, в різні моменти часу. Показано, що хвиля руйнування випереджає хвилю падіння тиску на 0,09 м для прийнятих умов моделювання.

Ключові слова: викид вугілля і газу, чисельне моделювання, тектонічне порушення.

Abstract. Analysis of geological conditions for the occurrence of sudden coal and gas outbursts in the central and other parts of Donbass shows that the majority of outbursts occurred in tectonically disturbed areas where the outburst is initiated by the penetration of a potential outburst danger zone. In order to determine the influence of the depth of penetration in the area of outburst on the development process of coal and methane outburst, a set of numerical experiments was executed. We used a mathematical model of coupled non-stationary processes of stress field change, filtering and methane desorption. It is shown that the geomechanical and filtration processes are moving from a quasi-stationary in a dynamic regime just inside the outburst danger zone. The coal permeability and methane filtration rate is sharply increasing, pressure of methane gradients take very high values. The curves of change of filtration parameters for different values of the penetration depth in outburst area at different times is demonstrated. It is shown that the wave of destruction advanced of a wave of pressure by 0.09 m to accept the simulation.

Keywords: coal and gas outburst, numerical simulation, tectonic displacement.

Стаття поступила в редакцію 13.07.2014

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Минеевым