

УДК 622.267.5

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЗГРУЖЕННОЙ ЗОНЫ В ЗАБОЕ ГОРНОЙ
ВЫРАБОТКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ ЕЕ ПОДВИГАНИЯ****¹Круковская В.В.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ФОРМУВАННЯ РОЗВАНТАЖЕНОЇ ЗОНИ У ВИБОЇ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ
ЗАЛЕЖНО ВІД ШВИДКОСТІ ЇЇ ПОСУВАННЯ****¹Круковська В.В.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***FORMATION OF UNLOADED ZONE IN THE MINE FACE DEPENDING ON
THE FACE ADVANCING RATE****¹Krukovska V.V.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine*

Аннотация. Как показывает практика, при высоких скоростях продвижения забоев повышается риск возникновения внезапных выбросов угля и газа. Выбирая расчетным методом значение скорости продвижения забоя, при которой глубина разгруженной зоны остается на безопасном уровне, можно предотвратить развязывание газодинамических процессов. Поэтому выполнение корректных расчетов с учетом физико-механических свойств пласта и вмещающих пород, параметров выработки, технологии ее проведения имеет большое значение для обеспечения безопасности горных работ.

В данной работе выполнено математическое и численное моделирование связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана с учетом их взаимного влияния и изменения во времени. Условием связи между геомеханическими и фильтрационными процессами служит зависимость коэффициентов проницаемости от компонент тензора напряжений. Обратная связь реализовывается через учет сил, обусловленных давлением газа, в расчете суммарной силы, действующей на каждую точку твердого тела. Задача решается в упруго-пластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора.

С помощью метода конечных элементов решена задача об изменении во времени размеров разгруженной области в забое горной выработки с учетом физико-механических свойств пласта и вмещающих пород, а также параметров выработки. Получены распределения значений геомеханического параметра Q^* , характеризующего разнокомпонентность поля напряжений, в различные моменты времени после выемки угля и породы. Определена зависимость изменения глубины разгруженной зоны от скорости продвижения забоя. Показано, что при увеличении скорости проведения выработки с 1 до 8 м/сут глубина разгруженной области в забое выработки сократится в 3,2-3,7 раза.

Ключевые слова: деформирование газонасыщенного массива, скорость продвижения забоя, предотвращение газодинамических процессов.

Угольная промышленность в современных условиях поставлена перед необходимостью увеличения темпов проведения подготовительных выработок и ведения очистных работ. Как показывает практика, при высоких скоростях продвижения забоев геомеханические и фильтрационные процессы, происходящие в массиве горных пород, приобретают более резкий динамичный характер, повышается риск возникновения внезапных выбросов угля, породы и газа, горных ударов, разломов почвы с выбросом газа и других динамических явлений [1]. При снижении скорости продвижения забоя увеличивается время между циклами выемки породы и угля. За это время приконтурные породы разгружаются от гор-

ного давления, призабойная часть угольного пласта дегазируется, значения модулей градиентов напряжений и давления метана падают до безопасных значений.

Скорость обнажения поверхности, достаточная для развязывания выброса, также зависит от свойств выбросоопасных пород [2-4]. Для более прочных пород она выше, чем для менее прочных, так как для отделения частиц прочного материала нужны более высокие градиенты давления газа, которые не возникают на обнажённой поверхности при медленном сбросе давления. Релаксация напряжений в толще пород происходит с определённой скоростью, определяемой их свойствами [5]. В течение времени выемки угля размеры разгруженной зоны в забое выработки быстро сокращаются, а затем, в течение последующего промежутка времени, соответствующего работам по креплению выработки и различным вспомогательным операциям, вновь увеличиваются. Если зона влияния уменьшается до величины, меньшей некоторого критического значения, то становится возможным внезапный выброс [6]. Выбирая расчётным методом значение скорости подвигания забоя, при которой глубина разгруженной зоны остаётся на безопасном уровне, можно избежать развязывания газодинамических процессов. Поэтому выполнение корректных расчётов с учётом физико-механических свойств пласта и вмещающих пород, параметров выработки, технологии её проведения имеют большое значение для повышения точности прогнозирования изменения во времени глубины разгруженной зоны в забое горной выработки. В связи с этим целью данной работы является исследование процесса увеличения размеров разгруженной области вокруг выработки во времени с помощью методов численного моделирования, которое позволяет учитывать все вышперечисленные факторы.

Постановка задачи. Рассмотрим газонасыщенный породный массив, вмещающий горную выработку. Примем гипотезу сплошности, горный массив будем считать однородным в пределах каждого породного слоя, фильтрационный поток – изотермическим, непрерывным.

Связанные процессы деформирования углепородного массива и нестационарной фильтрации метана описываются системой уравнений [7].

$$c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t);$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + k \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0.$$

где c_g – коэффициент демпфирования, кг/с/м³; $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объёма твёрдого тела, Н/м³; $P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве, Н/м³; p – давление газа, МПа; k – коэффициенты проницаемости, мДа, $k = f(\sigma_{ij})$ [8, 9]; $q(t)$ – функция газовыделения.

Задача решается в упруго-пластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора.

Начальные условия для поставленной задачи:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \quad p|_{t=0} = p_0,$$

где λ – коэффициент бокового распора; H – глубина разработки, м; p_0 – давление метана в нетронутом массиве, МПа.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0; & p|_{\Omega_3(t)} &= p_0; \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; & p|_{\Omega_4} &= 0,1 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка).

При решении поставленной задачи с помощью метода конечных элементов [10] на каждой временной итерации получим поля напряжений, зоны неупругих деформаций, поля коэффициентов проницаемости, давления метана и скоростей его фильтрации. Для анализа напряжённо-деформированного состояния породного массива в работе используется параметр $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующий разнокомпонентность поля напряжений.

Рассмотрим случай, когда выработка высотой 3 м проводится по выбросоопасному угольному пласту мощностью 1,5 м, на глубине 1200 м. Газоносность угля – 20 м³/т. Свойства пород, используемые при расчётах, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Свойства вмещающих пород и угля

Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, C , МПа	Угол внутреннего трения, φ , °	Прочность на растяжение, σ_p , МПа
Аргиллит	10 ⁴	0,2	3,5	30	2
Уголь	5·10 ³	0,2	1,75	30	1

Результаты расчёта. Выполним расчёт напряжённо-деформированного состояния породного массива с газоносным угольным пластом и горной выработкой для того, чтобы исследовать процесс увеличения размеров разгруженной области вокруг выработки во времени, после очередного подвигания забоя. Разгруженной будем считать область массива, в которой параметр $Q^* > 0,4$. В результате расчётов получим распределение значений параметра Q^* на различных временных итерациях. На рис. 1 показан график изменения глубины разгруженной зоны в забое выработки.

Допустим, что при заданных физико-механических свойствах пород, начальных и граничных условиях через сутки после выемки породы и угля глубина разгруженной зоны в забое выработки L_{cym} достигнет: а) 1,5 м; б) 2,0 м. В рассмотренных случаях 24-м часам будут соответствовать: а) 23 временные итерации; б) 46 временных итераций, рис. 1.

Изменение контура разгруженной зоны (распределение значений параметра Q^*) во времени при $L_{cym} = 1,5$ м и при $L_{cym} = 2$ м показано соответственно на рис. 2 и рис. 3.

При увеличении скорости подвигания забоя уменьшается среднее время $t_{разгр}$ между циклами выемки породы и угля, которое необходимо для разгрузки угольного пласта от горного давления и его дегазации, сокращается глубина разгруженной зоны угольного пласта в забое выработки, рис. 4.

Результаты расчётов показывают, что при увеличении скорости проведения выработки с 1 до 8 м/сут глубина разгруженной области в забое выработки сократится в 3,2-3,7 раза (при $1,5 \text{ м} \leq L_{сут} \leq 2,0 \text{ м}$).

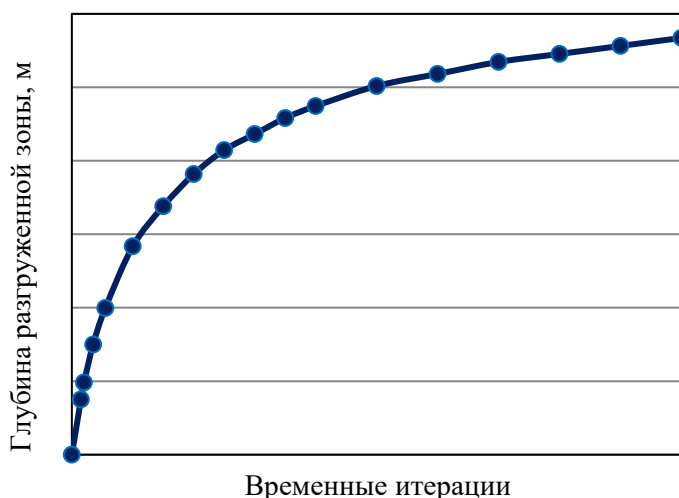
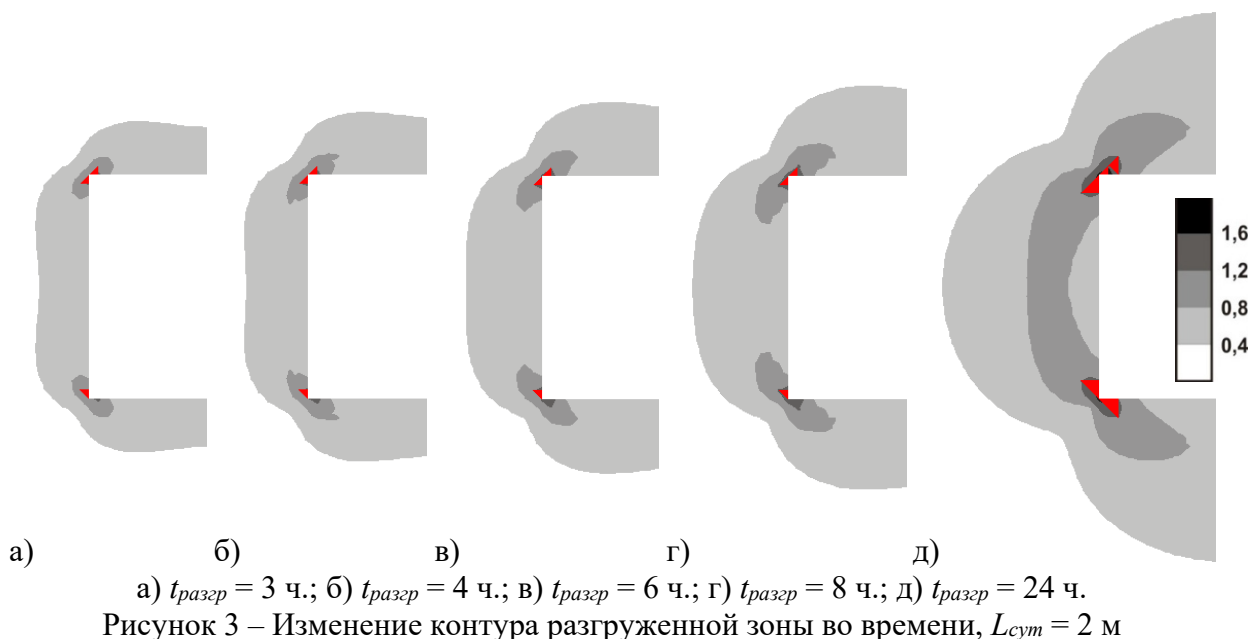
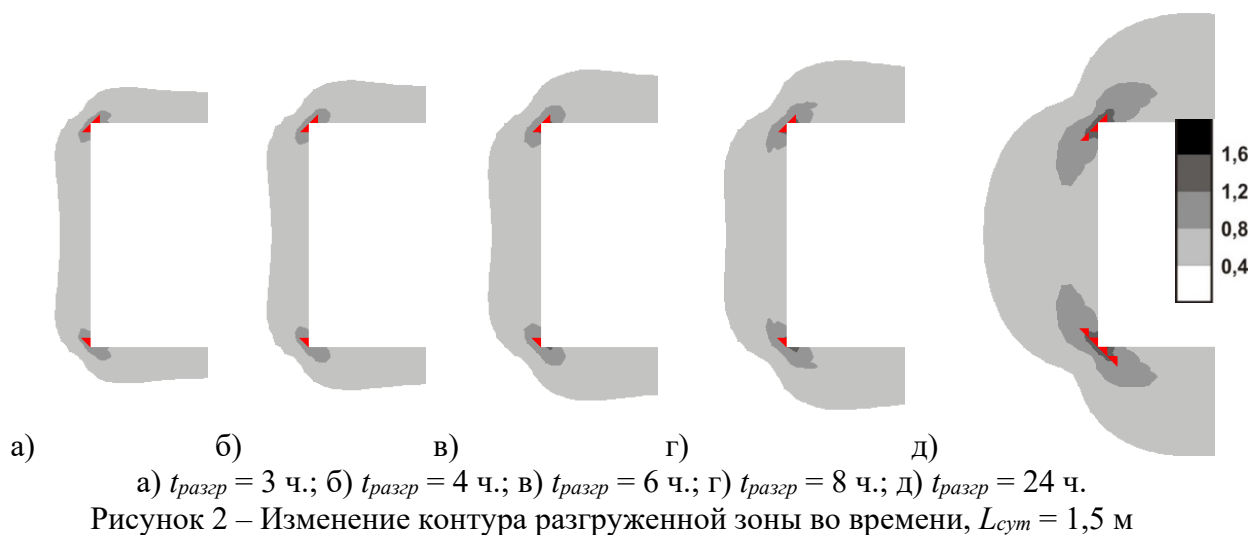


Рисунок 1 – Глубина разгруженной зоны на различных временных итерациях



Из графика, приведённого на рис. 4, следует: если глубина заходки составляет 0,8 м, то при $L_{сут} = 1,5$ м и принятых начальных и граничных условиях максимальная безопасная скорость продвижения забоя V_{max} , при которой вновь образованная поверхность забоя не выходит за пределы разгруженной области $V_{max} = 2,7$ м/сут, при $L_{сут} = 2,0$ м – $V_{max} = 5,3$ м/сут.

Выводы. С помощью метода конечных элементов решена задача об изменении во времени размеров разгруженной области в забое горной выработки с учётом физико-механических свойств пласта и вмещающих пород, а также параметров выработки. Получены распределения значений геомеханического параметра Q^* , характеризующего разнокомпонентность поля напряжений, в различные моменты времени после выемки угля и породы. Определена зависимость изменения глубины разгруженной зоны от скорости продвижения забоя. Показано, что при увеличении скорости проведения выработки с 1 до 8 м/сут глубина разгруженной области в забое выработки сократится в 3,2-3,7 раза.

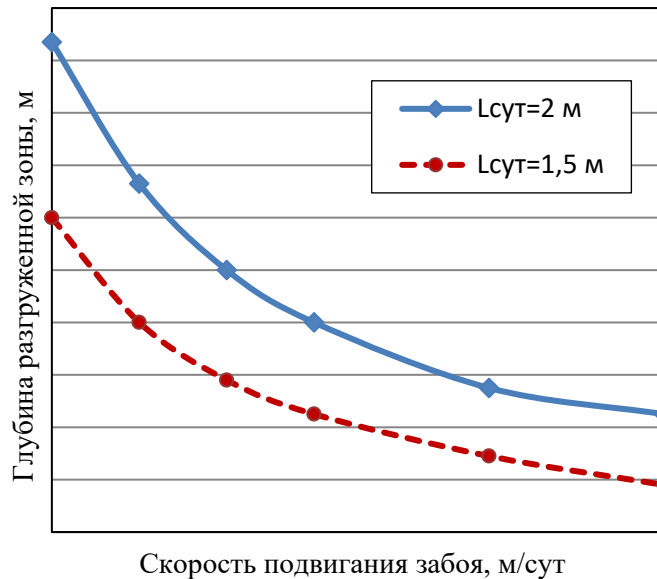


Рисунок 4 – Изменение глубины разгруженной зоны в забое выработки в зависимости от скорости продвижения забоя

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов / А.Д. Рубан, В.Б. Артемьев, В.С. Забурдяев и др. – М.: Издательство «Горная книга», 2010. – 500 с.
2. Петухов, И.М. Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа / И.М. Петухов, А.М. Линьков // Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа: сб. науч. трудов ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: Недра, 1978. – С. 62-91.
3. Петухов, И.М. Теоретические основы борьбы с выбросами угля, породы и газа / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – Уголь, 1975. – № 9. – С. 9-15.
4. Чеботков, И.П. Выбор рациональной скорости бурения скважин в выбросоопасных пластах / И.П. Чеботков, П.Я. Заставенко. – Уголь Украины, 1971. – № 7. – С. 44-45.
5. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело / К.З. Ушаков, Н.О. Каледина, Б.Ф. Кирич и др. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 487 с.
6. Институт угля Сибирского отделения РАН: Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational And Analytical Bulletin (Scientific And Technical Journal). – М.: Издательство «Горная книга», 2013. – 532 с.
7. Круковская, В.В. Метод расчета параметров связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана / В.В. Круковская, Д.А. Круковский / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2017. – № 132. – С. 17-26.
8. Круковская, В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ / В.В. Круковская / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 121. – С. 48-99.
9. Numerical modeling of stress-dependent permeability / M. Bai, F. Meng, D. Elsworth et al.: ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium / International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997. – № 34:3-4. – P. 2.e1-2.e14.

10. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – Т. 1. – 690 p.

REFERENCES

1. Ruban, A.D., Artemev, V.B., Ziburdaev, B.C. et al. (2010) *Podgotovka i razrabotka vyisokogazonosnykh ugolnykh plastov* [Preparation and development of high-gas-bearing coal seams], Publishing house "Mining book", Moscow, Russia.
2. Petuhov, I.M., Linkov, A.M. (1978) *Mehanizm razvyazyvaniya i protekaniya vyibrosov uglya (porodyi) i gaza* [Mechanism of starting and behavior of coal (rock) and gas outbursts], *Osnovy teorii vnezapnykh vyibrosov uglya, porodyi i gaza: sb. nauch. trudov IGD im. A.A. Skochinskogo*, Nedra, Moscow, pp. 62-91, Russia.
3. Petuhov, I.M., Linkov, A.M. (1975) *Teoreticheskie osnovy borby s vyibrosami uglya, porodyi i gaza* [Theoretical bases of struggle against coal, rock and gas outbursts], *Coal*, no. 9, pp. 9-15, Russia.
4. Chebotkov, I.P., Zastavenko, P.Ya. (1971) *Vyibor ratsionalnoy skorosti bureniya skvazhin v vyibrooopasnykh plastakh* [Choosing a rational speed of drilling wells in outburst-hazardous layers], *Coal of Ukraine*, no. 7, pp. 44-45, Ukraine.
5. Ushakov, K.Z., Kaledina, N.O., Kirin, B.F. et al. (2008) *Bezopasnost vedeniya gornykh rabot i gornospasatelnoe delo* [Safety of mining and mine rescue], Publishing house of the Moscow State Mining University, Moscow, Russia.
6. Mining Informational And Analytical Bulletin (2013), Publishing house "Mining book", Moscow, Russia.
7. Krukovska, V.V., Krukovskyi, D.O. (2017) *Metod rascheta parametrov svyazannykh protsessov deformirovaniya ugleporodnogo massiva i filtratsii metana* [Method of calculation parameters of coupled processes of coal-rock massif deformation and methane filtration], *Geotechnical Mechanics*, Dnipropetrovsk, no. 132, pp. 17-26, Ukraine.
8. Krukovskaya, V.V. (2015) *Modelirovaniye svyazannykh protsessov, proishodyaschikh v ugleporodnom massive pri vedenii gornykh rabot* [Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations], *Geotechnical Mechanics*, Dnipropetrovsk, no. 121, pp.48-99, Ukraine.
9. Bai, M., Meng, F., Elsworth, D. et al. (1997) Numerical modeling of stress-dependent permeability, ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, no. 34:3-4, pp. 2.e1-2.e14.
10. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000) *The finite element method*, Butterworth-Heinemann.

Про авторів

Круківська Вікторія Вікторівна, доктор технічних наук, старший научний співробітник, старший научний співробітник відділу управління динамічними проявленнями гірського тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, igtm@ukr.net

About the authors

Krukovska Victoriya Victorivna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net

Анотація. Як показує практика, при високих швидкостях просування вибоїв підвищується ризик виникнення раптових викидів вугілля і газу. Вибираючи розрахунковим методом значення швидкості просування вибою, при якій глибина розвантаженої зони залишається на безпечному рівні, можна запобігти розв'язуванню газодинамічних процесів. Тому виконання коректних розрахунків з урахуванням фізико-механічних властивостей пласта і вміщувачих порід, параметрів виробки, технології її проведення має велике значення для забезпечення безпеки гірничих робіт.

У даній роботі виконано математичне та чисельне моделювання зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву і фільтрації метану з урахуванням їх взаємного впливу і зміни в часі. Умовою зв'язку між геомеханічними і фільтраційними процесами служить залежність коефіцієнтів проникності від компонент тензора напружень. Зворотній зв'язок реалізується через облік сил, обумовлених тиском газу, в розрахунку сумарної сили, що діє на кожен точку твердого тіла. Задача розв'язується в пружно-пластичній постановці. Для математичного опису процесу переходу гірських порід в порушений стан застосовується умова міцності Кулона-Мора.

За допомогою методу скінченних елементів розв'язано задачу про зміну в часі розмірів розвантаженої області у вибої гірничої виробки з урахуванням фізико-механічних властивостей пласта і вміщувачих порід, а також параметрів виробки. Отримано розподіли значень геомеханічного параметра Q^* , що характеризує різнокомпонентність поля напружень, в різні моменти часу після виїмки вугілля і породи. Визначено залежність зміни глибини розвантаженої зони від швидкості просування вибою. Показано, що при збільшенні швидкості проведення виробки з 1 до 8 м/сут глибина розвантаженої області у вибої виробки скоротиться в 3,2-3,7 рази.

Ключові слова: деформування газонасиченого масиву, швидкість просування вибою, запобігання газодинамічних процесів.

Abstract. As practice shows, risk of sudden coal and gas outbursts increases at high rate of the face advancing. It is possible to prevent gas dynamic processes if to choose by calculation method such rate of advancing, at which depth of unloaded zone remains at a safe level. Therefore, performing of correct calculations with taking into account coal-and-rock physical and mechanical properties, parameters of mine tunnel and technology of mining is of great importance.

In this paper, mathematical and numerical simulation of coupled processes of coal-and-rock massif deformation and methane filtration was performed with taking into account their mutual influence and changes on a timeline. Condition for interconnection between geomechanical and filtration processes is dependence between permeability coefficients and

stress tensor components. Feedback is realized through forces caused by gas pressure taken into account in calculation of total force acting on each point of the solid. The problem is solved through plasto-elastic condition. The Mohr-Coulomb strength condition is applied for mathematical description of the process of rocks transition into disturbed state.

The problem of dimensions of unloaded region changing on a timeline in the mine face was solved by the finite element method, which took into account physical and mechanical properties of the coal-rock mass and parameters of the mine working. Distribution of values of geomechanical parameter Q^* , which characterizes the stress field, at various time points after coal-and-rock extraction were obtained. Dependence of unloaded zone depth on the rate of the face advancing was determined. It is shown that with increase of advancing rate from 1 m/day up to 8 m/day depth of the unloaded area in the mine face is reduced by 3,2-3,7 times.

Keywords: deformation of the gas-saturated massif, rate of the face advancing, prevention of gas dynamic processes.

Статья поступила в редакцию 02.02.2018

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