

УДК 622.411.332.023.623:622.83

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОХРАНЫ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

В. В. Круковская, А. П. Круковский, В. Н. Кочерга

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49005, Украина. E-mail: igtm@ukr.net

Выполнено численное моделирование процесса фильтрации метана в нарушенной зоне угленосного массива вблизи выработанного пространства, с двумя дегазационными скважинами. При этом учитывалась зависимость коэффициентов проницаемости от соотношения компонент тензора главных напряжений.

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния угленосного массива, устойчивости дегазационных скважин, процесса фильтрации метана и эффективности дегазации кровли скважинами в зависимости от способа охраны выемочного штрека. Получены поля напряжений, зоны неупругих деформаций и распределения параметров фильтрации метана для случаев применения стоек, ремонтин, костров, двух рядов органной крепи, буюкостров, чурбаковых перемычек. Показано, что без использования охранных конструкций дегазационные скважины при их подработке разрушаются и прекращают работу, а применение каждого вида охранных конструкций повышает эффективность дегазации кровли скважинами на 8-40 %.

Ключевые слова: фильтрация метана, дегазационные скважины, эффективность дегазации кровли скважинами.

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДЕГАЗАЦІЙНИХ СВЕРДЛОВИН ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РІЗНИХ СПОСОБІВ ОХОРОНИ ВИЙМКОВОГО ШТРЕКА

В. В. Круковська, О. П. Круковський, В. М. Кочерга

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, Україна. E-mail: igtm@ukr.net

Виконано чисельне моделювання процесу фільтрації метану в порушеній зоні вугленосного масиву поблизу виробленого простору, з двома дегазаційними свердловинами. При цьому урахувалась залежність коефіцієнтів проникності від співвідношення компонент тензора головних напружень.

Проведено дослідження напружено-деформованого стану вугленосного масиву, стійкості дегазаційних свердловин, процесу фільтрації метану і ефективності дегазації покрівлі свердловинами в залежності від способу охорони виймкового штреку. Отримано поля напружень, зони непружних деформацій і розподіли параметрів фільтрації метану для випадків застосування стійок, ремонтин, кострів, двох рядів органного кріплення, буюкострів, чурбакових перемичок. Показано, що без використання охоронних конструкцій дегазаційні свердловини при їх підробці руйнуються і припиняють роботу, а застосування кожного виду охоронних конструкцій підвищує ефективність дегазації покрівлі свердловинами на 8-40 %.

Ключові слова: фільтрація метану, дегазаційні свердловини, ефективність дегазації покрівлі свердловинами.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Для проветривания выемочных участков угольных шахт часто применяется возвратночная схема. При этом исходящая вентиляционная струя примыкает к отработанному угольному массиву, а вентиляционная выработка за лавой не обслуживается и не контролируется [1-2]. В таких условиях дегазационные скважины можно бурить только впереди очистного забоя навстречу его движению. При отсутствии охраны выемочного штрека после прохода лавы дегазационные скважины разрушаются, и их отключают от дегазационной системы [1]. Применение различных способов охраны выемочного штрека снижает разнокомпонентность поля напряжений вокруг выработки, сокращает зону неупругих деформаций над выработанным пространством. Устойчивость дегазационных скважин при применении костров повышается на 6-20 %, костров и 2 рядов органной крепи – на 30-33 %; буюкостров и 2 рядов органной крепи – на 43-50 %; буюкостров, 2 рядов органной крепи и чурбаковой перемычки – на 45-56 % [3].

Цель работы – с использованием метода конечных элементов провести численное моделирование процесса фильтрации метана в зоне влияния очистного забоя и выполнить оценку эффективности работы дегазационных скважин при использовании различных способов охраны выемочного штрека.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Исследуем влияние способа охраны выемочного штрека на процесс фильтрации метана в угленосном массиве и эффективность работы системы дегазационных скважин. Рассмотрим горную выработку, проведенную в слоистом массиве горных пород, закрепленную рамно-анкерной крепью, с двумя дегазационными скважинами, с различными охранными сооружениями, рис. 1, впереди и позади очистного забоя. Если рассматривать движение лавы, когда она уже отошла от разрезной печи на достаточное расстояние и движется с постоянной скоростью, то можно заметить, что область фильтрации будет перемещаться вместе с плоскостью очистного забоя, с такой же скоростью. При этом уравнения, описывающие движение метана в этой области, граничные и начальные условия останутся неизменными в любой момент времени. Следовательно, при движении лавы распределения основных параметров будут перемещаться, не изменяясь, со скоростью движения лавы. В этом случае процесс фильтрации можно считать установившимся в подвижной системе координат, связанной с движущейся линией забоя [4-5], и при условии наличия в области фильтрации газоносных пород описывать его квазистационарным уравнением неразрывности газового потока [6-7]:

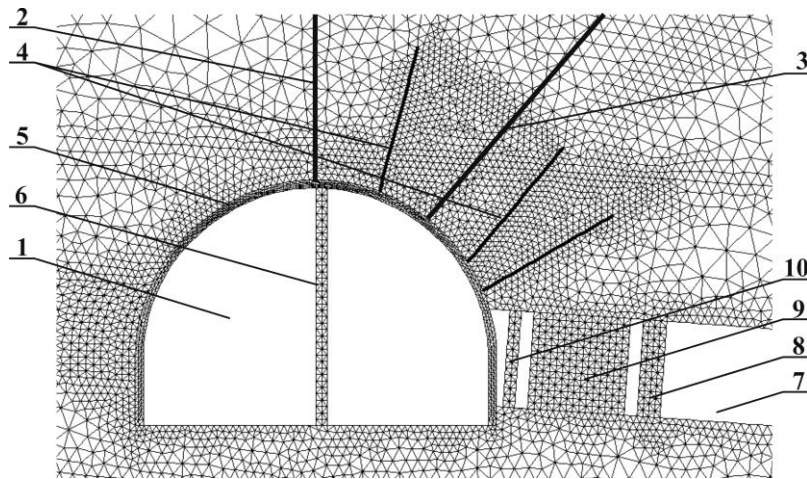


Рисунок 1 – Центральний фрагмент кінечно-елементної сітки: 1 – виробочка; 2 – дегазаційна скважина № 1; 3 – дегазаційна скважина № 2; 4 – сталеполімерні анкери; 5 – рамна кріп; 6 – ремонтина; 7 – вироботане простірство; 8 – 2 ряди органічної кріпи; 9 – костер (бутокостер); 10 – стойка

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (1)$$

где k_x, k_y – коэффициенты проницаемости, определяемые в зависимости от соотношения компонент тензора главных напряжений [7]; p – давление газа; ρ – плотность газа; μ – вязкость газа; $q(t)$ – функция метановыделения.

Граничные условия для данной задачи – давление метана в нетронутом массиве – p_0 , давление в очистном забое и прилегающих выработках – 0,1 МПа.

Задача решается с применением метода конечных элементов [8–9]. Моделирование работы анкеров осуществляется согласно способу исследования состояния горного массива вокруг горной выработки с анкерной крепью (Патент Украины № 100666). Верификация модели фильтрации газа в нарушенной области была выполнена путем сравнения расчетных данных по газовыделению в скважину с аналитическими решениями; по распределению давления газа вокруг скважины и изменению давления в подрабатываемом угольном пропластке – с экспериментальными данными.

Рассмотрим следующие варианты использования охранных конструкций: 1) охранные конструкции не применяются; 2) стойка, ремонтина, костер; 3) стойка, ремонтина, костер, 2 ряда органичной кріпи; 4) стойка, ремонтина, бутокостер, 2 ряда органичной кріпи; 5) стойка, бутокостер, 2 ряда органичной кріпи, чурбачковая перемычка.

Как объект для проведения исследований была выбрана высоконагруженная 1-я северная лава блока № 3 пласта d_4 ПАО «ШУ «Покровское». Конвейерный штрек проведен на глубине 580 м, вентиляционный – на глубине 550 м. Угол падения пласта 3–5°, мощность – 1,5 м. Длина лавы – 256 м. Газоносность песчаников – 0,7–0,9 м³/т, угольного пласта d_4 и пропластков d_4^1 и d_4^2 – 20 м³/т. Длина дегазационных скважин 48 м, глубина герметизации – 10 м.

Ранее были рассчитаны поля напряжений, деформаций, зоны неупругих деформаций [3] для пяти рассмотренных вариантов поддержания выемочного штрека, рис. 2. Было показано, что применение каждого вида охранных конструкций выводит от 5 до 10 % длины скважины из опасной зоны. В вариантах расчета № 2–5 область неупругих деформаций все дальше отодвигается от выработки и от устья дегазационной скважины № 2.

В результате решения уравнения (1) были получены распределения давления метана, скорости его фильтрации, расходы в каждой точке области и в дегазационных скважинах.

Вариант № 1. Охранные конструкции не применяются. Область пониженного давления метана охватывает выработанное пространство, рис. 3 а. Вокруг скважин давление метана соответствует давлению в нетронутом массиве, что говорит об отсутствии процесса фильтрации газа из источников в дегазационную систему. В этом случае дебит метана в дегазационные скважины № 1 и 2 практически равен нулю, табл. 1.

Таблица 1 – Дебит метана при различных вариантах охраны штрека

Скважина	Дебит метана в скважинах в различных вариантах расчета, м ³ /мин				
	1	2	3	4	5
№ 1	0,05	0,93	0,93	0,93	0,93
№ 2	0,00	0,00	3,07	3,68	4,23

Большая часть метана из источников, расположенных в кровле, поступает не в дегазационную систему, а в выработанное пространство, т.к. ничем не поддерживаемый правый борт выработки разрушается, целостность скважин нарушена – они попадают в зону неупругих деформаций, рис. 2.

Метан из подработанных и надработанных песчаников и угольных пропластков справа от скважины № 2 перемещается в выработанное пространство, рис. 3 б.

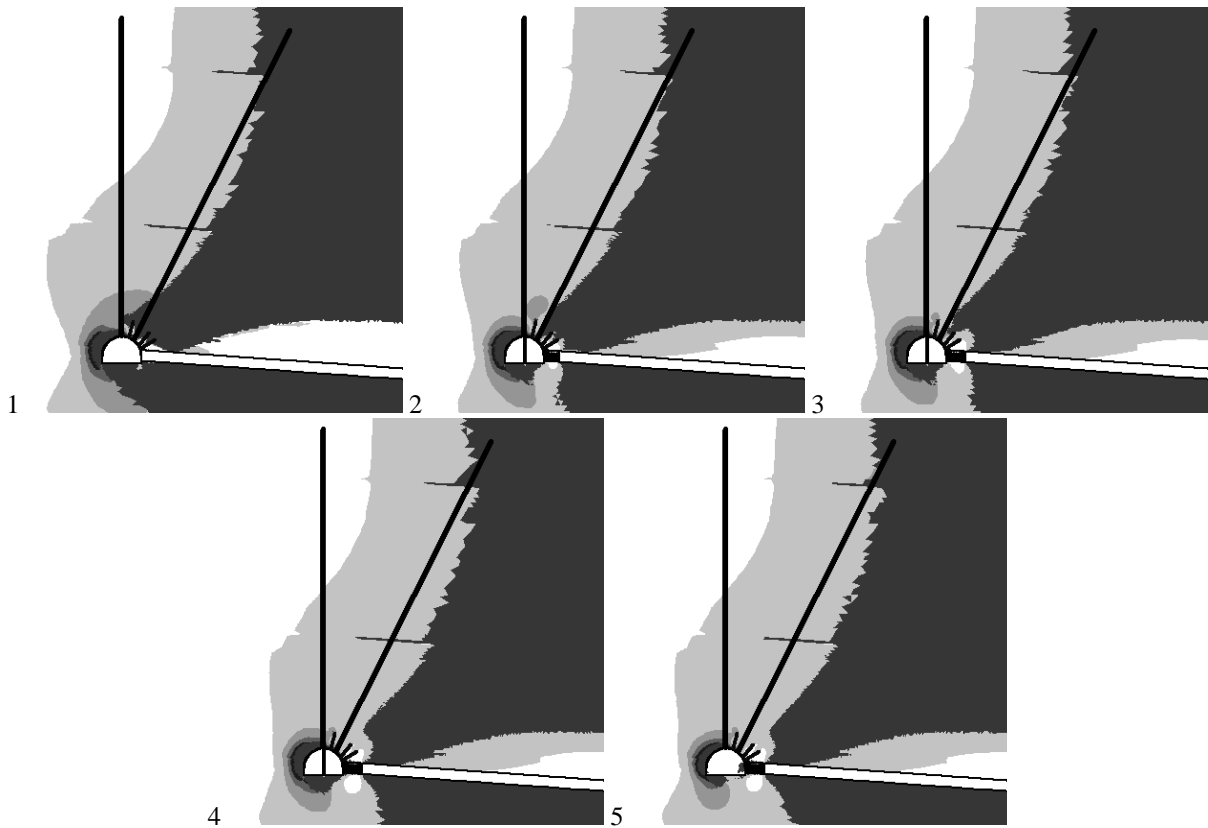


Рисунок 2 – Расположение дегазационных скважин относительно зоны неупругих деформаций для пяти рассмотренных вариантов расчета

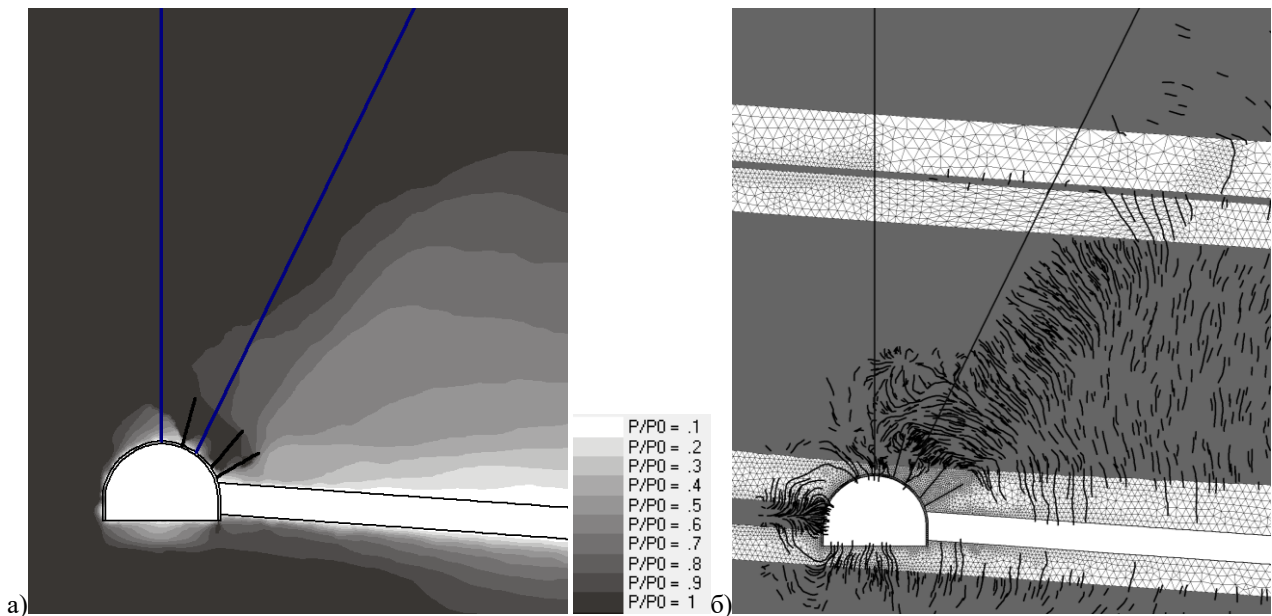


Рисунок 3 – Параметры фильтрации метана, вариант № 1:
а) – относительное давление; б) – траектории движения потоков метана

В атмосферу выемочного штрека попадает метан из обрабатываемого пласта и песчаников кровли и почвы.

Вариант № 2. Применение стоек, ремонтин и костров изменяет ситуацию в лучшую сторону. Граница области неупругих деформаций, окружающей

выработанное пространство, слегка отодвигается от дегазационных скважин благодаря укреплению образовавшейся над выработанным пространством консоли, рис. 2.

Вокруг скважины № 1 образовывается область пониженного давления метана – скважина работает,

метан поступає з джерел газовиділення, розташованих в кровлі, в дегазаційну систему. Однак скважина № 2 по-прежнему пересікає зону неупругих деформацій над виробланим простором. Дебіт метана в ній рівен нулю, табл. 1. Обширна область пониженого тиску навколо виробланим простором говорить об активній фільтрації метана в цій зоні.

Варіант № 3. Якщо к охранным конструкціям, розглянутим раніше, додати 2 ряди органної кріпи, скважина № 2 виходить із зони руйнування і вступає в роботу по дегазації кровлі. Навколо виробланим простором зберігається область пониженого тиску.

Варіант № 4. Породно-анкерная консоль над виробланим простором утримується в устійчивом стані, завдяки чому дегазаційні скважини не пересікають границю області неупругих деформацій і зберігають свою работоспособность навіть після проходження лави. Метан із підробланим і надробланим піщаників і угольних пропластків переміщується як в виробланим простором, так і в дегазаційні скважини.

Варіант № 5. В цьому випадку досягається найбільший результат по дегазації підробланим джерел газовиділення. Параметри фільтрації метана в досліджуваній області гірної масиви для цього випадку представлені на рис. 4.

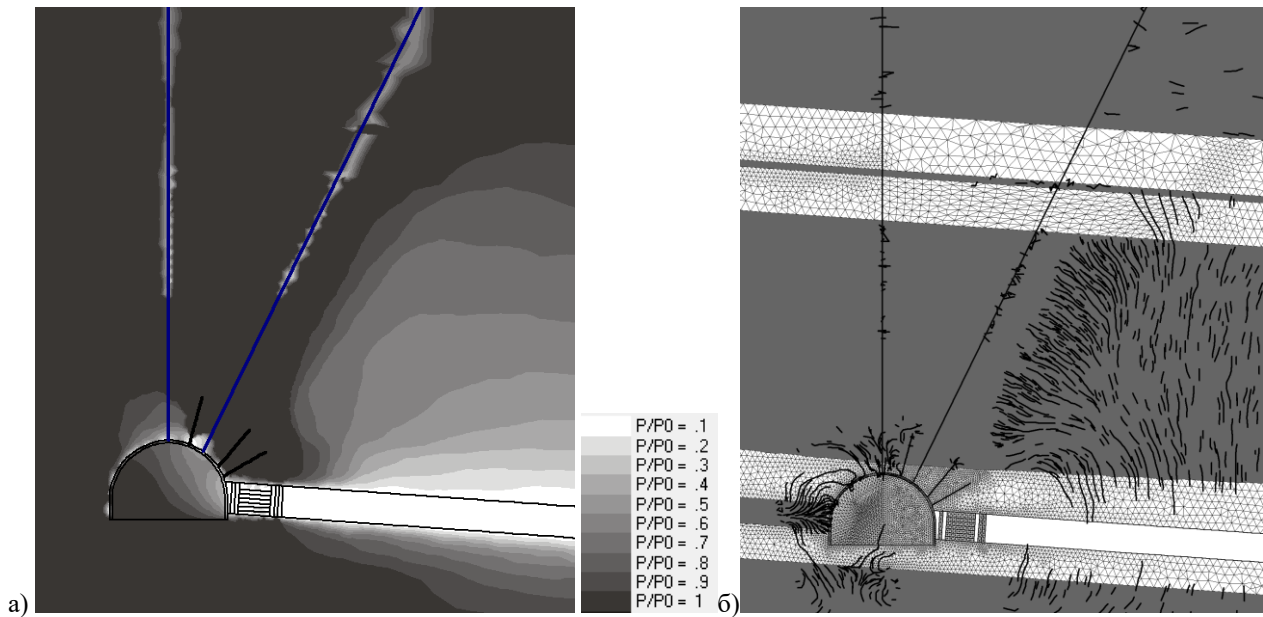


Рисунок 4 – Параметри фільтрації метана, варіант № 6:
а) – відносний тиск; б) – траєкторії руху потоків метана

Приведенні дані свідчать про те, що без використання охранных конструкцій дегазаційні скважини при їх підроботці руйнуються і припиняють роботу. Використання стійки, ремонтної, коста приводить до невеликого скорочення області руйнування – робота скважини № 1 відновлена. При подальшій усталі охранных конструкцій дебіт в двох дегазаційних скважинах зростає до 4,61 м³/мін (стійка, ремонтна, бутокостер, 2 ряди органної кріпи) і 5,16 м³/мін (стійка, бутокостер, 2 ряди органної кріпи, чурбакова перемичка). При одночасній роботі 8-10 скважин сумарний дебіт метано-повітряної суміші становить відповідно 18,44-23,05 і 20,52-25,65 м³/мін, що підтверджується експериментальними даними, отриманими при достаточній віддаленні лави від розрізної печі на ділянці 1-ї південної лави пласта d₄ блоку № 3 ПАО «ШУ «Покровське».

Степень дегазації пласта (джерела метана) [10] визначається як відношення різниці природної і залишкової метаносності пласта до його природної метаносності.

$$D_{пл} = \frac{g_0 - g_{ост}}{g_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для розрахунку ступеня дегазації підробланим породи кровлі оброблюваного пласта скважинами із (2) отримуємо:

$$D_{кр} = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} Q_{сквi}}{\sum_{j=1}^{N_1} Q_j} \cdot 100\% \quad (3)$$

де Q_j – об'єм метана в j -м джерелі метановиділення, розрахований по природній метаносності; N_1 – кількість джерел метановиділення в кровлі; $Q_{сквi}$ – кількість метана, каптированное i -ою скважиною за розглянутий період часу; N_2 – кількість одночасно працюючих скважин.

В табл. 2 наведені результати розрахунку ефективності дегазації кровлі скважинами по формулі (3).

Применение каждого вида охранных конструкций повышает эффективность дегазации кровли скважинами на 8-40 %.

Таблица 2 – Эффективность дегазации кровли скважинами

Вариант охраны выемочного штрека	Эффективность дегазации, %
Охранные конструкции не применяются	0,68
Стойка, ремонтна, костер	12,66
Стойка, ремонтна, костер, 2 ряда органной крепи	54,24
Стойка, ремонтна, бутокостер, 2 ряда органной крепи	62,60
Стойка, бутокостер, 2 ряда органной крепи, чурбаковая перемычка	70,06

ВЫВОДЫ. Без использования охранных конструкций дегазационные скважины при их подработке разрушаются и прекращают работу. Использование стойки, ремонтны, костра приводит к небольшому сокращению области разрушения – работа скважины № 1 восстановлена. При дальнейшем усилении охранных конструкций дебит метана в двух дегазационных скважинах возрастает до 5,16 м³/мин (стойка, бутокостер, 2 ряда органной крепи, чурбаковая перемычка).

При одновременной работе 8-10 скважин с использованием всех описанных охранных конструкций суммарный дебит метано-воздушной смеси составит 20,52-25,65 м³/мин, что подтверждается экспериментальными данными, полученными на участке 1-й северной лавы пласта d₄ блока № 3 ПАО «ШУ «Покровское» при достаточном удалении лавы от разрезной печи.

Эффективность дегазации кровли скважинами при применении костров составляет 12,7 %; костров и 2 рядов органной крепи – 54,2 %; бутокостров и 2 рядов органной крепи – 62,6 %; бутокостров, 2 рядов органной крепи и чурбаковой перемычки – 70,1 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Эффективность комплексной дегазации выемочных участков на шахте «Краснолиманская» / В.Н. Кочерга, И.В. Сытник, Г.С. Левчинский // Уголь Украины, 2014. – № 11. – С. 26–31.
2. Кияшко Ю.И., Круковская В.В. Особенности фильтрации метана в выработки выемочного участка при различных схемах проветривания // Проблемы общислывальной механики і міцності конструкцій: Зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2012. – Вип. 18. – С. 71–78.
3. Влияние способа охраны выемочного штрека на устойчивость дегазационных скважин / А.П. Круковский, В.В. Круковская, В.Н. Кочерга // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 124. – С. 16–31.
4. Круковская В.В., Круковский А.П. Метод расчета параметров фильтрации метана с учетом напряженного состояния углепородного массива // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2007. – С. 152–154.
5. Виноградов Ю.А. Исследование водопритока в горную выработку в зависимости от способа ее крепления / Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1(15). – С. 89–95.
6. The finite element method for fluid dynamics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, P. Nithiarasu. – Butterworth-Heinemann, 2014. – 544 p.
7. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – № 121. – С. 48–99.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
9. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.
10. Фундаментально-прикладные методы решения проблем метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. – М.: Изд. Академии горных наук, 2000. – 519 с.

THE CHANGE OF THE ROCK MASSIF STRESS STATE IN THE WORKING FACE DURING DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

V. Krukovskaya, A. Krukovskiy, V. Kocherga

Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine
vul. Simferopolskaya, 2a, Dnepro, 49005, Ukraine. E-mail: igtm@ukr.net.

Purpose – to perform evaluation of the efficiency of degasification wells using different ways to protect the gate road. **Methodology.** Numerical simulation of methane filtration process in the disturbed zone of coal rock massif near goaf with two degasification wells is executed. It was taken into account the dependence of the permeability coefficients of correlation components tensor of the principal stresses. **Results.** Studies of the stress-strain state of coal-rock mass, degassing wells stability, the methane filtration process and the efficiency of roof degasification by wells depending on how the protection of gate road were performed. Stresses fields, inelastic deformations zones and distribution of methane filtration parameters for cases of application props, scaffolds, timber cribs, two rows of cutting-off support, pack-timber cribs, wood billets were obtained. **Originality.** For the first time we determined the effect of various supporting constructions on the formation of ruptured zone over the open area near the gate road, on the degasification wells stability and effectiveness of their work. **Practical value.** The results and methods of calculation will allow to optimize the choice of degasification wells parameters in specific geological conditions. **Conclusions.** It is proved that

without the use of protective structures degassing boreholes at undermining their collapse and stop functioning, and the use of each type of protections improves the efficiency of roof degasification by wells of 8-40 %. References 10, tables 2, figures 4.

Key words: methane filtration, degassing wells, efficiency of roof degasification by wells.

REFERENCES

1. Kocherga, V.N., Syitnik, I.V., Levchinskiy, G.S. (2014), "The effectiveness of integrated degassing excavation sites on «Krasnolimanskaya» mine", *Ugol Ukrainyi*, no. 11, pp. 26–31.
2. Kiyashko, Yu.I., Krukovskaya, V.V. (2012), "Specificities features of the methane filtration in mining face at various ventilation systems", *Problemy obchyslivalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruksii*, no. 18, pp. 71–78.
3. Krukovskiy, A.P., Krukovskaya, V.V., Kocherga, V.N. (2015), "Effect of the gate road protection method for stability degasification wells", *Geotechnical Mechanics*, no. 124, pp.16–31.
4. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. (2007), "The method of calculating methane filtration parameters based on the stress state of coal rock mass", *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie yavleniya v gorniyh porodah i vyirabotkah*, pp. 152–154.
5. Vinogradov, Yu.A. (2015), "The study of water inflow in mines, depending on the method of support", *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva*, no. 1/(15), pp. 89–95.
6. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Nithiarasu, P. (2014), *The finite element method for fluid dynamics*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain.
7. Krukovskaya, V.V. (2015), "Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations", *Geotechnical Mechanics*, no. 121, pp.48–99.
8. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000), *The finite element method*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain.
9. Fadeev, A.B. (1987) *Metod konechnykh elementov v geomehanike* [Finite element method in geomechanics], Nedra, Moscow, Russia.
10. Malyishev, Yu.N., Trubetskoy, K.N., Ayruni, A.T. (2000), *Fundamentalno-prikladnyie metodyi resheniya problem metana ugolnyih plastov* [Fundamental and applied methods for solving the problems of coalbed methane], Publish. Academy of Mine Sciences, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 30.08.2016.