

УДК 622.267.5

Круковский А.П.

Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова

Минеев С.П.

Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова

Круковская В.В.

Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова

Беликов И.Б.

Центральный штаб ГВГСС Украины

Янжула А.С.

Шахтоуправление «Покровское»

Гулай А.А.

Шахтоуправление «Покровское»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ ВБЛИЗИ ИЗОЛИРОВАННОГО ПОЖАРНОГО УЧАСТКА

В статье выполнено численное исследование фильтрационной проницаемости углеродного массива с изолированным участком, действующей подготовительной выработкой и барьерным целиком в зависимости от его напряженного состояния. Разработаны рекомендации по определению безопасной ширины изоляционного целика в условиях ПАО «ШУ «Покровское». Исключена фильтрация пожарных газов в конвейерный штрек 7-й прим южной лавы блока 10, обеспечена безопасность ведения очистных работ по газовому фактору.

Ключевые слова: *фильтрационная проницаемость, напряженно-деформированное состояние, пожарные газы, барьерные целики.*

Постановка проблемы. Подготовка выемочного столба 7-й прим южной лавы блока 10 на ПАО «ШУ «Покровское» проводилась в границах ранее подготовленного выемочного участка 7-й южной «бис» лавы блока 10, в выработках которой в августе 2016 года произошла вспышка метановоздушной смеси с последующим возникновением пожара, рис. 1. В связи с этим было принято решение об изоляции аварийного участка путем установки двух перемычек:

- перемычку № 1 – в промежуточном штреке 7 южной «бис» лавы блока 10;
- перемычку № 2 – в 7 южном «бис» конвейерном штреке блока 10.

Согласно требованиям КД 12.01.401-96 «Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение. Инструкция», очистные работы вблизи пожарного участка необходимо вести с оставлением барьерных целиков, ширина которых определяется расчетом, но не должна быть

меньше 20 м. Расчет ширины барьерных целиков в данном случае необходимо выполнять, исходя из двух условий – обеспечения их устойчивости и газовой непроницаемости. Во время пожаров в угольных шахтах резко изменяется состав атмосферы: снижается содержание кислорода и увеличивается содержание диоксида углерода, оксида углерода, водорода, предельных и непредельных углеводородов [1]. При определенных значениях проницаемости пород целика и перепада давления может произойти утечка пожарных газов в атмосферу нового выемочного участка.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование фильтрационной проницаемости углеродного массива с изолированным участком, действующей подготовительной выработкой и барьерным целиком в зависимости от его напряженного состояния.

Изложение основного материала исследования. 7-я прим южная лава блока 10 находится в юго-восточ-

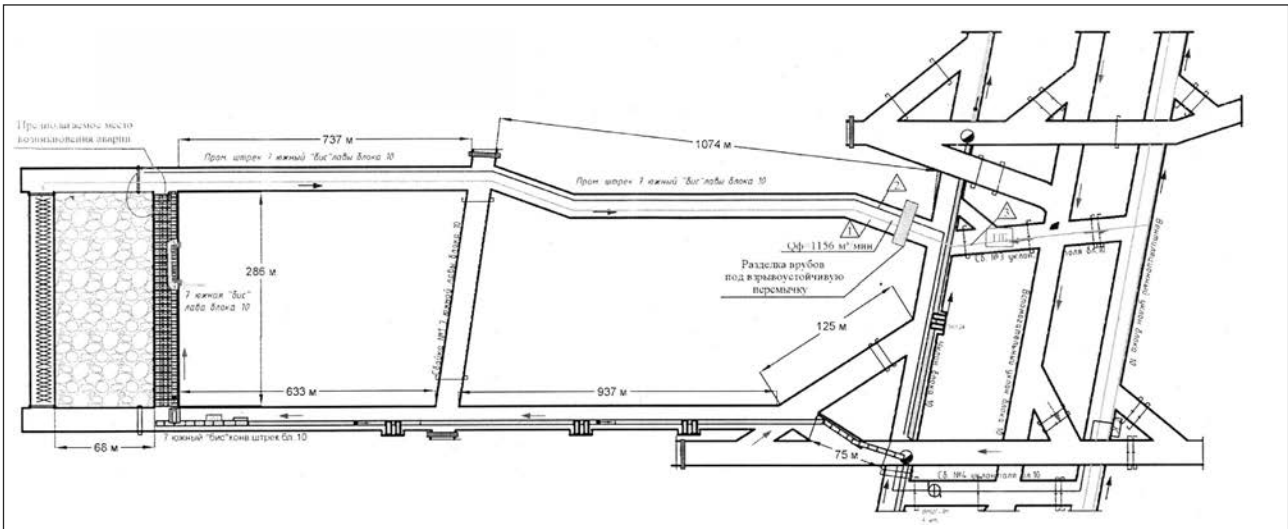


Рис. 1. Схема аварийного участка 7-й южной «бис» лавы блока 10

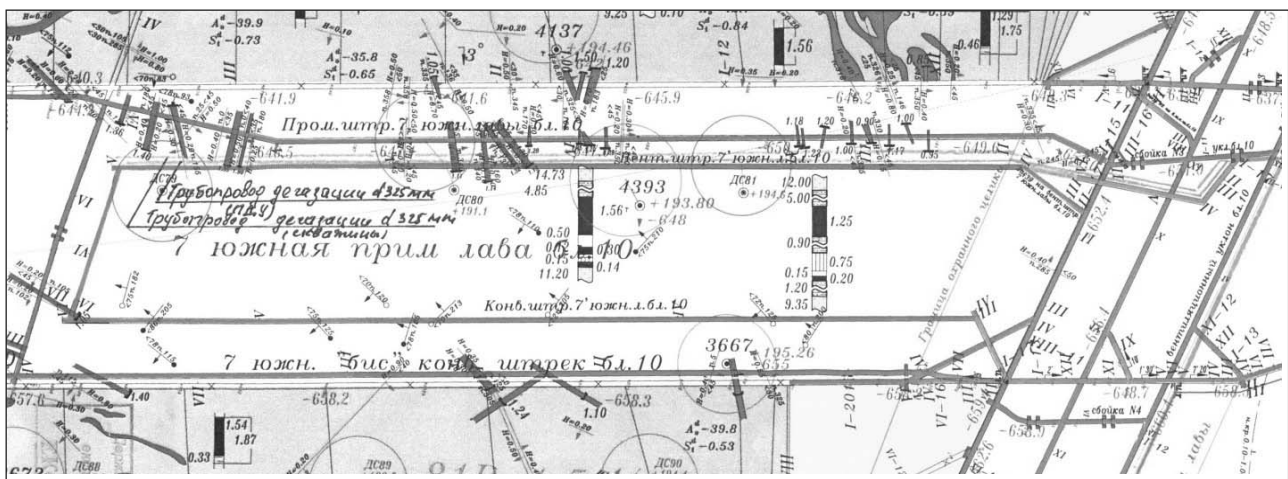


Рис. 2. Выкопировка из плана горных выработок, 7-я прим южная лавы блока 10

ной части шахтного поля. Проектная длина выемочного столба – 918 м, длина лавы – 158 м. Угольный пласт d4 на площади выемочного поля имеет простое строение, реже сложное. Его геологическая мощность колеблется в пределах 1,17–1,57 м, средняя по столбу – 1,45 м. Глубина ведения горных работ – 840 м.

Барьерный целик расположен между изолированным 7 южным «бис» конвейерным штреком блока 10 и конвейерным штреком 7-й прим южной лавы блока 10 (рис. 2), сведения о котором представлены в табл. 1.

Для расчета проницаемости углеродного массива необходимо определить параметры его напряженно-деформированного состояния, которое описывается системой уравнений:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции

внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м³.

Таблица 1

Сведения о проведении конвейерного штрека 7-й прим южной лавы блока 10

Параметры	Конвейерный штрек 7-й прим южной лавы блока 10
Способ проведения	Комбайновый
Средства проведения	КСП-43
Форма сечения	Шагровое
Сечение, м ²	
– в проходке	20,3
– в свету до осадки	17,7
– в свету после осадки	14,9
Тип крепи	КШПУ-17,7
Длина выработки	1005
Шаг крепи	0,67
Затяжка	сетка

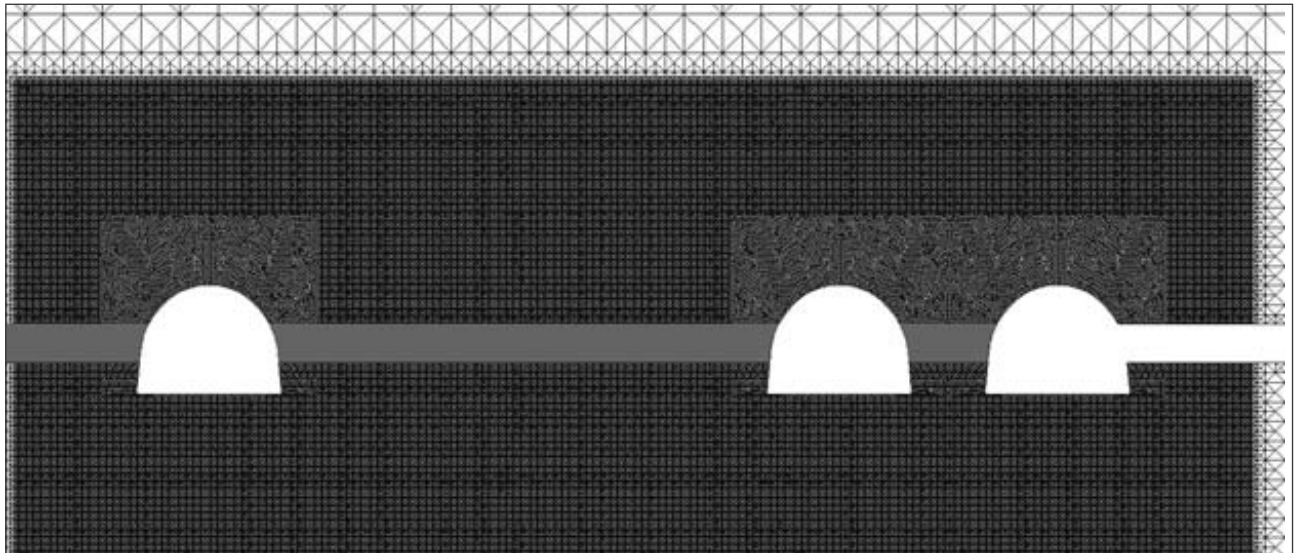


Рис. 3. Центральний фрагмент конечно-элементной сетки

Граничные условия:

$$\begin{aligned} u_x|_{\Omega_1} &= 0; \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0, \end{aligned}$$

где u_i – перемещения, м; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура.

В результате ведения горных работ перераспределяется поле начальных напряжений, что обуславливает изменение фильтрационной проницаемости k угленосного массива [2; 3]. Будем считать, что значения k в каждой точке исследуемой области зависят от компонент тензора главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ следующим образом [4; 5]:

– в нетронутом горном массиве $k = 0$ при

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H} < 0,6;$$

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

– в области начального и интенсивного трещинообразования $k = k_{\min}$ при $0,7 < Q^* < 0,8$ и $k = e^{0,26Q^* - 4,65}$ (или

$$k = e^{\frac{2,58(\sigma_1(t) - \sigma_3(t))}{\sigma_2(t)} - 4,65} \text{) при } Q^* > 0,8;$$

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

То есть

$$\begin{cases} k = 0 \text{ при } Q^* < 0,6; \\ k = 0 \text{ при } Q^* < 0,7; P^* > 0,25; \\ k = k_{\min} \text{ при } 0,7 < Q^* < 0,8; \\ k = e^{0,26Q^* - 4,65} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* > 0,1; \\ k = k_{\max} \text{ при } Q^* > 0,8; P^* < 0,1. \end{cases}, \quad (2)$$

В окрестности тектонических нарушений уголь перемят, на 10–20 м по обе стороны от нару-

шения имеет начальную проницаемость. На поле начальной, тектонической, проницаемости $k_{\text{мект}}$ накладывается поле технологической проницаемости k [6]:

$$K = k_{\text{мект}}(x, y) + k(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \quad (3)$$

Уравнение плоской фильтрации газа при условии наличия в области фильтрации газоносных пород:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial q_i}{\partial t}, \quad (4)$$

где p – давление газа, МПа, $q(t)$ – функция газовыделения.

Граничные условия для данной задачи можно определить следующим образом:

$$p|_{\Omega_1} = p_0;$$

$$p|_{\Omega_2} = 0,1 \text{ МПа};$$

$$p|_{\Omega_3} = p_1 \text{ МПа},$$

где p_0 – пластовое давление метана, МПа, Ω_1 – граница области фильтрации, Ω_2 – внутренний контур, выработка № 1 (рис. 3), Ω_3 – внутренний контур, выработка № 2 и выработанное пространство (рис. 3), p_1 – давление газа в выработанном пространстве, МПа.

Для решения связанных уравнений (1) и (4) с условиями связи (2), (3) применяется метод конечных элементов [7; 8]. Расчетная схема области горных пород с тремя выработками и выработанным пространством представлена на рис. 3. Здесь выработка № 1 – конвейерный штрек 7-й прим южной лавы блока 10, № 2 – изолированный 7 южный «бис» конвейерный штрек блока 10, № 3 – 7 южный

Таблица 2

Координаты целика по оси x

Ширина целика, L_u , м	Координата x_1 , м	Координата x_2 , м
20	83	103
30	73	103
40	63	103

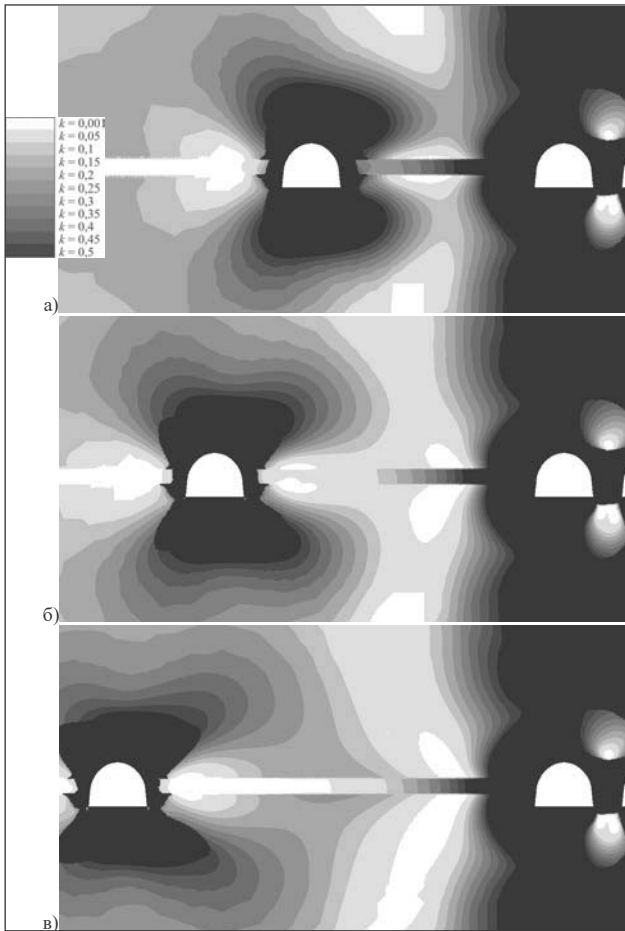


Рис. 4. Проницаемость углеродного массива а) ширина целика – 20 м; б) 30 м; в) 40 м

Расчеты выполнены для 3 случаев: ширина целика между выработками № 1 и № 2 составляет 20, 30 и 40 м. Давление газа в выработке № 2 и выработанном пространстве варьируется в диапазоне 3–6 МПа. Получены поля напряжений и области неупругих деформаций для каждого случая. Рассчитано поле коэффициентов проницаемости в исследуемой области (рис. 4 и 5), давление и расход газа.

При ширине целика $L_u=20$ м (рис. 4а) области фильтрации вокруг выработки № 1 и выработанного пространства связаны и по угольному пласту, и по вмещающим породам. При определенном значении перепада давления возможна фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1. При $L_u=30$ м (рис. 4б) области фильтрации вокруг выработки № 1 и выработанного пространства практически не связаны, между ними находится непроницаемая перемычка – область, фильтрационная проницаемость пород в которой ≈ 0 . В этом случае, при аналогичных граничных условиях, фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1 невозможна. При

$L_u=40$ м (рис. 4в) области фильтрации вокруг выработки № 1 и выработанного пространства также не связаны между собой, непроницаемая перемычка увеличилась в объеме по сравнению с предыдущим случаем. Фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1 невозможна.

На рис. 5 показаны графики изменения расчетной проницаемости угольного пласта между выработками № 1 и № 2. Координаты x_1 и x_2 целика для рассмотренных случаев приведены в табл. 2.

Видно, что при $L_u=20$ м на всем протяжении целика проницаемость угольного пласта $k > 0$, что означает возможность фильтрации газа через него. При определенном значении перепада дав-

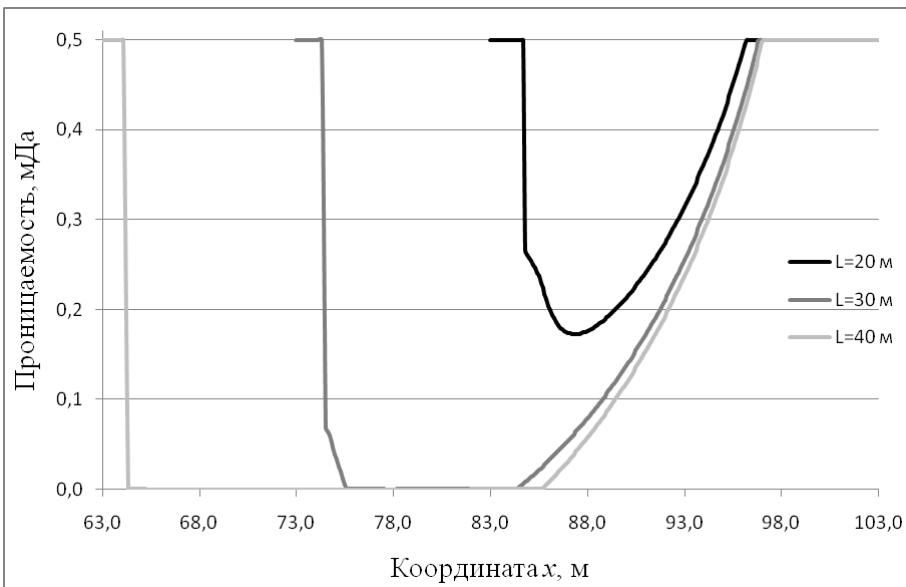


Рис. 5. Проницаемость по угольному пласту при различной ширине целика L_u

конвейерный штрек блока 10 (неподдерживаемый вентиляционный штрек ранее отработанного выемочного поля 8-й южной лавы блока 10).

целика проницаемость угольного пласта $k > 0$, что означает возможность фильтрации газа через него. При определенном значении перепада дав-

ления в выработках № 1 и № 2 возможна фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1.

При $L_u=30$ м на участке целика длиной 10 м угольный пласт непроницаем, $k=0$, что препятствует фильтрации газа из одной выработки в другую.

При $L_u=40$ м угольный пласт непроницаем на еще большем промежутке длиной 22 м, фильтрация газа из одной выработки в другую невозможна.

В зоне геологических нарушений поле коэффициентов проницаемости изменится согласно соотношениям (2) и (3), рис. 6 и 7.

Значения коэффициентов проницаемости вдоль угольного пласта во всех трех случаях повысились. Видно, что только при $L_u=40$ м угольный пласт непроницаем на относительно небольшом промежутке длиной 5 м (рис. 7).

Результаты расчета удельного дебита газа Q в выработке № 1 и № 2 при различных значениях перепада давления ΔP в них и при ширине целика 20 м показаны на рис. 8. Отрицательные значения Q означают приток газа в выработку, положительные – отток.

При увеличении депрессии ΔP удельное газовыделение в выработку № 1 растет на участках с тектоническим нарушением и без него (две нижние кривые на рис. 8). С увеличением ΔP удельное газовыделение в выработку № 2 снижается до 0, затем начинается фильтрация газа из выработки № 2 и выработанного пространства в выработку № 1. В зоне тектонического нарушения такой поворот направления фильтрации происходит при гораздо меньших значениях депрессии ΔP .

В настоящее время завершилась отработка 7 прим южной лавы блока 10. Выемка угля осуществлялась комбайном МВ-630. Крепление в лаве – ЗКД90Т. Схема проветривания возвратноточная, типа 1-М. На выемочный участок подавалось 1450 м³/мин воздуха. Концентрация метана оставалась в пределах 0,6–0,8%. Темпы перемещения забоя составляли 8,5 м/сутки, объем добычи – 4150 т/сут.

В процессе выемки производились измерения концентрации метана, оксида углерода, диоксида

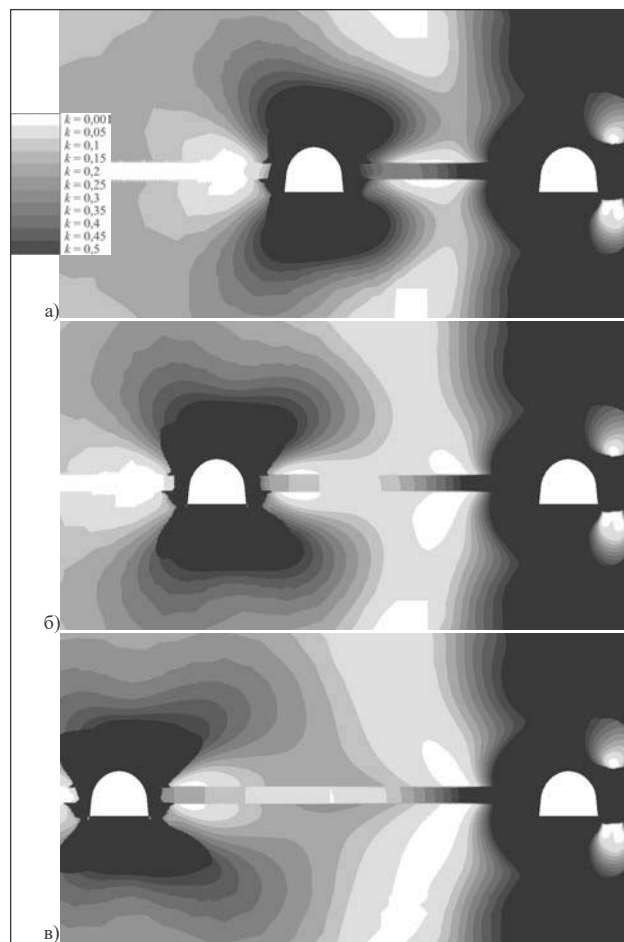


Рис. 6. Проницаемость углеродного массива в нарушенной зоне
а) ширина целика – 20 м; б) 30 м; в) 40 м

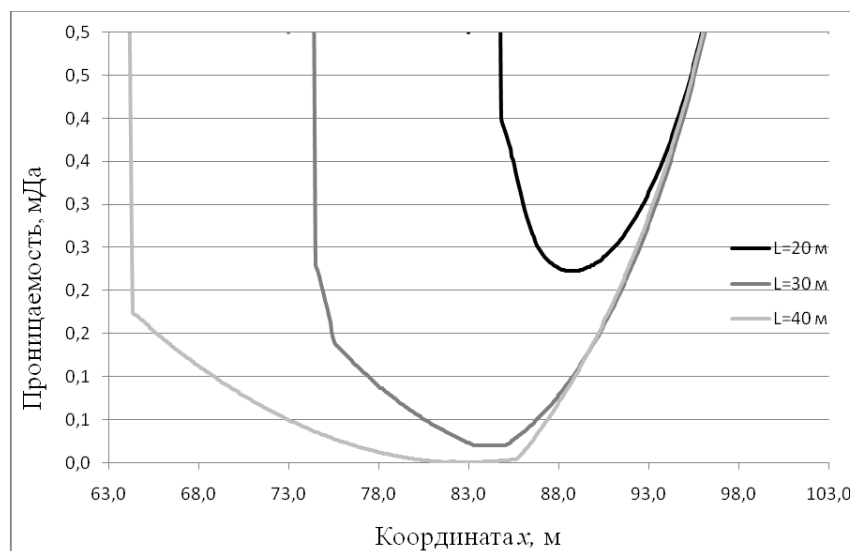


Рис. 7. Проницаемость по угольному пласту между выработками № 1 и № 2 в зоне тектонической нарушенности при различной ширине целика L_u

углерода и водорода. Лабораторный анализ проб рудничного воздуха производился еженедельно в

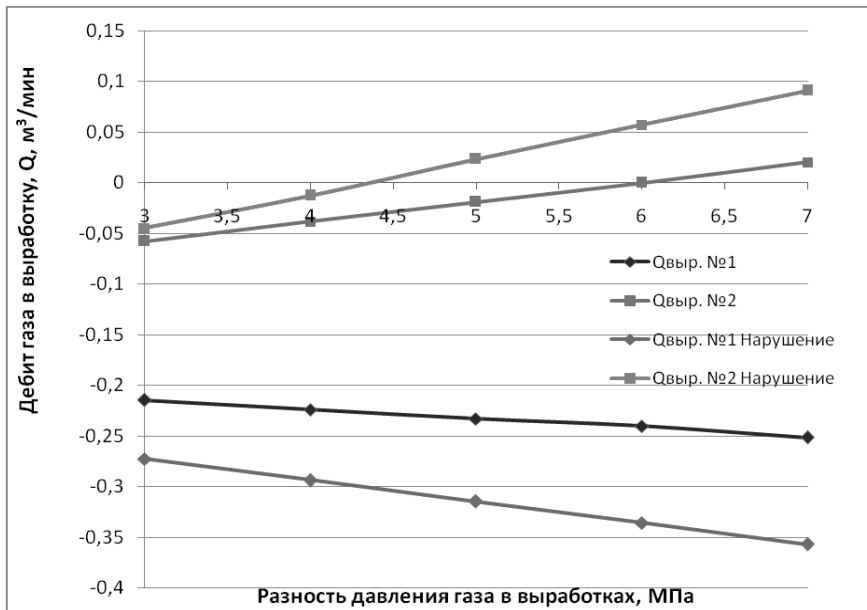


Рис. 8. Метановиділення в виработки

газоаналитической лаборатории ГВГСС Украины. За время работы выемочного участка не было выявлено превышений предельно допустимых, а также фоновых значений оксида углерода и водорода, как в рудничной атмосфере оконтуривающих горных выработок, так и в трубопроводах различного назначения (дегазации пластов-спутников, дегазации выработанного пространства, изолированного отвода метана).

Выводы. Выполнен анализ горнотехнических характеристик выемочного участка 7 южной прим лавы блока 10 ПАО «ШУ «Покровское».

Разработаны конечно-элементные модели участков углепородного массива с горными выработками, между которыми оставлены барьерные целики различной ширины. Выполнен расчет параметров фильтрации газа для условий выемочного участка 7 южной прим лавы блока 10. В результате анализа полученных расчетных данных показано, что при рассмотренных начальных и граничных условиях минимальная ширина целика, необходимая для обеспечения его газовой непроницаемости, – 30 м, на тектонически нарушенном участке – 40 м. Разработаны «Рекомендации по определению безопасной ширины изоляционного целика по параметрам фильтрации газа в выработки выемочного участка для условий 7 южной прим лавы блока 10 пласта d4 ПАО «ШУ «Покровское». В результате применения разработанных рекомендаций исключена фильтрация пожарных газов в конвейерный штрек 7-й прим южной лавы блока 10, обеспечена изоляция аварийного участка 7-й южной «бис» лавы блока 10 и безопасность ведения очистных работ по газовому фактору.

Список литературы:

1. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. и др. Оценка концентраций индикаторных газов в очистных забоях ШУ «Покровское». Геотехническая механика. 2017. № 133. С. 148–157.
2. Bai M., Meng F., Elsworth D. et al. Numerical modeling of stress-dependent permeability. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 1997. № 34:3-4. P. 2.e1–2.e14.
3. Durucan S., Daltaban T.S., Shi J.Q., Foley L. Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams. Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa, Alabama. 1993. P. 453–460.
4. Булат А.Ф. Круковская В.В. Компьютерное моделирование фильтрации метана в подработанном горном массиве в трехмерной постановке. Геотехническая механика. 2005. № 57. С. 3–12.
5. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ. Геотехническая механика. 2015. № 121. С. 48–99.
6. Лукинов В.В., Круковский А.П., Круковская В.В. Моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических. Форум гірників-2007. Матеріали міжнародної конференції. Дніпропетровськ: ГУ. 2007. С. 63–69.
7. Zienkiewicz O.C. Taylor R.L. The finite element method. Butterworth-Heinemann. 2000. Т. 1. 690 p.
8. Hutton D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis. 2004. 505 p.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОЇ ПРОНИКНОСТІ БАР'ЄРНИХ ЦІЛИКІВ
ПРИ ВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ РОБІТ ПОБЛИЗУ ІЗОЛОВАНОЇ ПОЖЕЖНОЇ ДІЛЬНИЦІ**

У статті виконано чисельне дослідження фільтраційної проникності вуглепородного масиву з ізолюваною ділянкою, діючою підготовчою виробкою і бар'єрним цілком у залежності від його напруженого стану. Розроблено рекомендації щодо визначення безпечної ширини ізоляційного цілика в умовах ПАТ «ШУ «Покровське». Виключена фільтрація пожежних газів у конвеєрний штрек 7-ї прим південної лави блоку 10, забезпечена безпека ведення очисних робіт по газовому фактору.

Ключові слова: *фільтраційна проникність, напружено-деформований стан, пожежні гази, бар'єрні цілики.*

**INVESTIGATION OF FILTRATION PERMEABILITY OF BARRIER PILLARS
AT PERFORMING MINING OPERATIONS NEAR THE ISOLATED FIRE AREA**

In the article, a numerical study of the filtration permeability of a coal-rock massif with an isolated area, active mine working and a barrier pillar, depending on its stress state is performed. Recommendations for determining the safe width of the insulating pillar in the conditions of Mine Management "Pokrovskoye" are developed. The fire gases filtration into the Conveyer Gangway of the 7th Southern "prim" Lava of Block 10 was excluded, the gas safety at the mining work was ensured.

Key words: *filtration permeability, deflected mode, fire gases, barrier pillars.*