

УДК 622.267.5

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ
БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ВБЛИЗИ ИЗОЛИРОВАННОГО ПОЖАРНОГО УЧАСТКА****¹Круковский А.П., ¹Круковская В.В.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***НАПРУЖЕНИЙ СТАН І ФІЛЬТРАЦІЙНА ПРОНИКНІСТЬ БАР'ЄРНИХ ЦІЛИКІВ
ПОБЛИЗУ ІЗОЛЬОВАНОЇ ПОЖЕЖНОЇ ДІЛЬНИЦІ****¹Круковський О.П., ¹Круковська В.В.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***STRESS STATE AND FILTRATION PERMEABILITY OF BARRIER PILLARS
NEAR THE ISOLATED FIRE AREA****¹Krukovskyi O.P., ¹Krukovska V.V.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Аннотация. Во время пожаров в угольных шахтах резко изменяется состав атмосферы: снижается содержание кислорода и увеличивается содержание диоксида углерода, оксида углерода, водорода и других газов. Согласно нормативным требованиям очистные работы вблизи пожарного участка необходимо вести с оставлением барьерных целиков. Расчет их ширины необходимо выполнять, исходя из двух условий – обеспечения устойчивости и газовой непроницаемости. Целью работы является исследование фильтрационной проницаемости углепородного массива с изолированным участком, действующей подготовительной выработкой и барьерным целиком в зависимости от его напряженного состояния.

Разработаны конечно-элементные модели углепородного массива с горными выработками, между которыми оставлены барьерные целики различной ширины. С применением метода конечных элементов выполнен расчет полей напряжений и областей неупругих деформаций для 3 случаев: ширина целика между выработками составляет 20, 30 и 40 м. С использованием результатов геомеханических расчетов рассчитаны поля коэффициентов проницаемости, распределения давления и расхода газа в исследуемой области. Построены графики изменения проницаемости целиков.

Показано, что при ширине целика 20 м области фильтрации вокруг изолированного пространства и действующей выработки связаны и по угольному пласту, и по вмещающим породам. При определенном значении перепада давления возможна фильтрация пожарных газов из изолированного пространства в действующую выработку. При ширине целика 30 м области фильтрации вокруг изолированного пространства и действующей выработки практически не связаны, между ними находится непроницаемая зона. В этом случае фильтрация газа через барьерный целик маловероятна. При ширине целика 40 м протяженность непроницаемой перемычки увеличивается.

Ключевые слова: напряженное состояние, фильтрационная проницаемость, пожарные газы, барьерный целик.

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.

Поэтому целью данной работы является исследование фильтрационной проницаемости углепородного массива с изолированным участком, действующей подготовительной выработкой и барьерным целиком в зависимости от его напряженного состояния.

Математическая модель фильтрации пожарных газов через барьерные целики в зависимости от напряженного состояния углепородного массива. Для расчета проницаемости углепородного массива необходимо определить параметры его напряженно-деформированного состояния, которое описывается системой уравнений:

$$\sigma_{ij,j} + X_i = 0,$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; X_i – проекции внешних сил, действующих на единицу объема породы, Н/м³.

Граничные условия:

$$u_x|_{\Omega_1} = 0;$$

$$u_y|_{\Omega_2} = 0,$$

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

Для анализа напряженного состояния породного массива используются параметры:

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}, \text{ характеризующий разнокомпонентность поля напряжений;}$$

$$P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H}, \text{ характеризующий разгрузку пород от горного давления,}$$

где σ_1, σ_3 – максимальная и минимальная компоненты тензора главных напряжений, МПа; γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина разработки, м.

В результате ведения горных работ перераспределяется поле начальных напряжений, что обуславливает изменение фильтрационной проницаемости k углепородного массива [2, 3]. Будем считать, что значения k в каждой точке исследуемой области зависят от геомеханических параметров Q^* и P^* следующим образом [4, 5]:

- в нетронутом горном массиве $k = 0$ при $Q^* < 0,6$;
- в зоне упругих деформаций и равнокомпонентного сжатия $k = 0$ при $Q^* < 0,7$; $P^* > 0,25$;
- в области начального и интенсивного трещинообразования $k = k_{\min}$ при $0,7 < Q^* < 0,8$ и $k = e^{0,26Q^* - 4,65}$ при $Q^* > 0,8$;
- в области разрушения горных пород $k = k_{\max}$, при $P^* < 0,1$; $Q^* > 0,8$.

Уравнение плоской фильтрации газа при условии наличия в области фильтрации газоносных пород [6]:

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

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

Граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned} p|_{\Omega_1} &= p_0; \\ p|_{\Omega_2} &= 0,1 \text{ МПа}; \\ p|_{\Omega_3} &= p_1 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

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

Расчеты выполнены с применением метода конечных элементов [6, 7]. Конечно-элементная сетка для области горных пород с тремя выработками и выработанным пространством представлена на рис. 1.

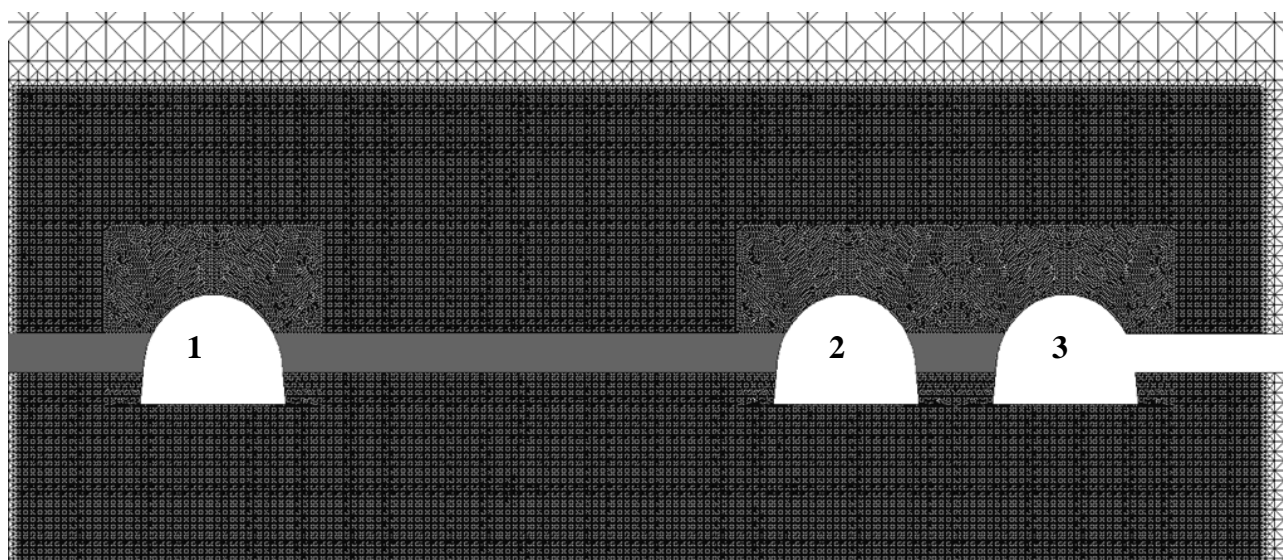


Рисунок 1 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

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.

Результаты расчетов. В результате расчетов получены распределения значений компонент тензора главных напряжений, рис. 2, и областей неупругих деформаций, рис. 3, для каждого случая.

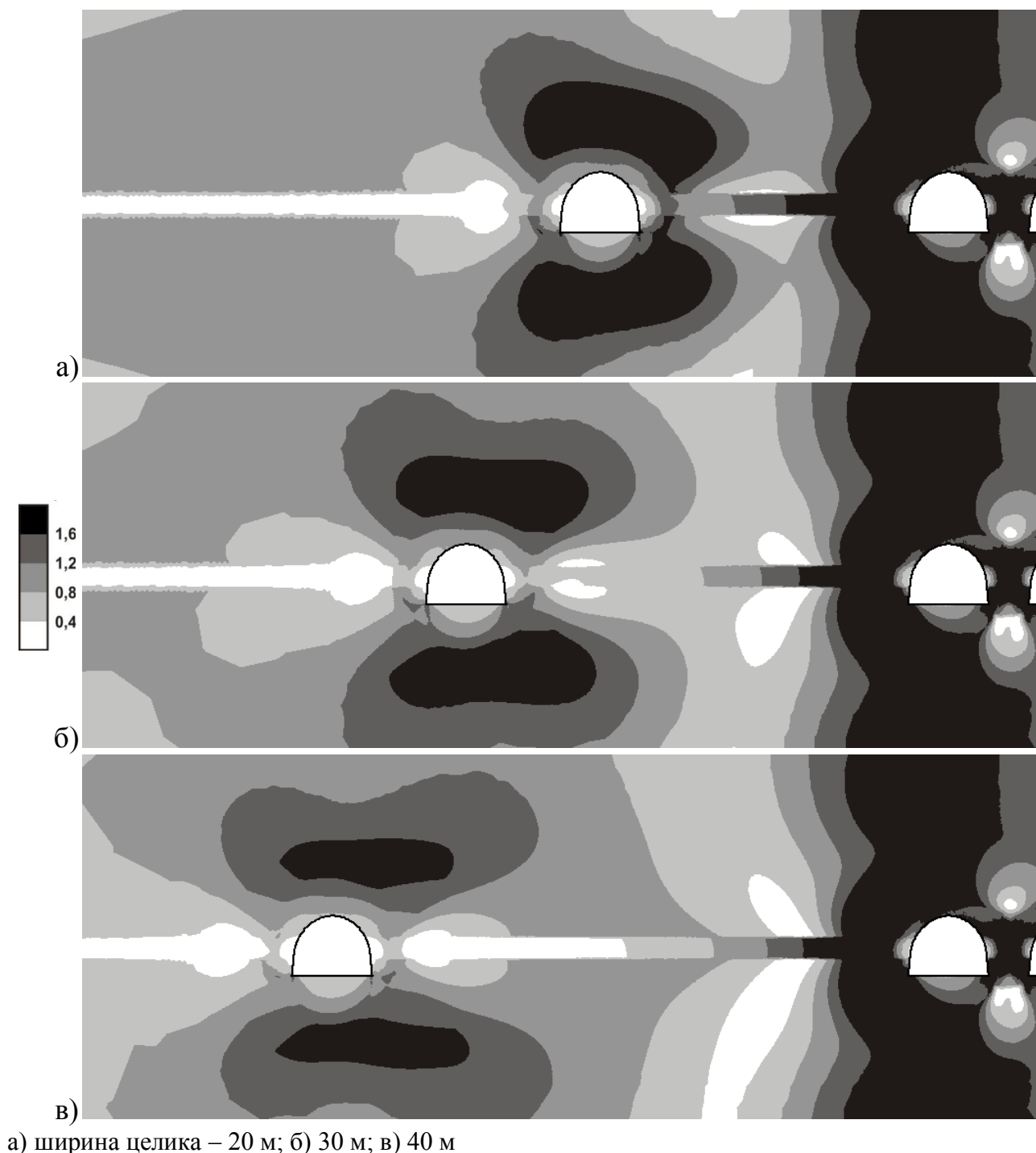
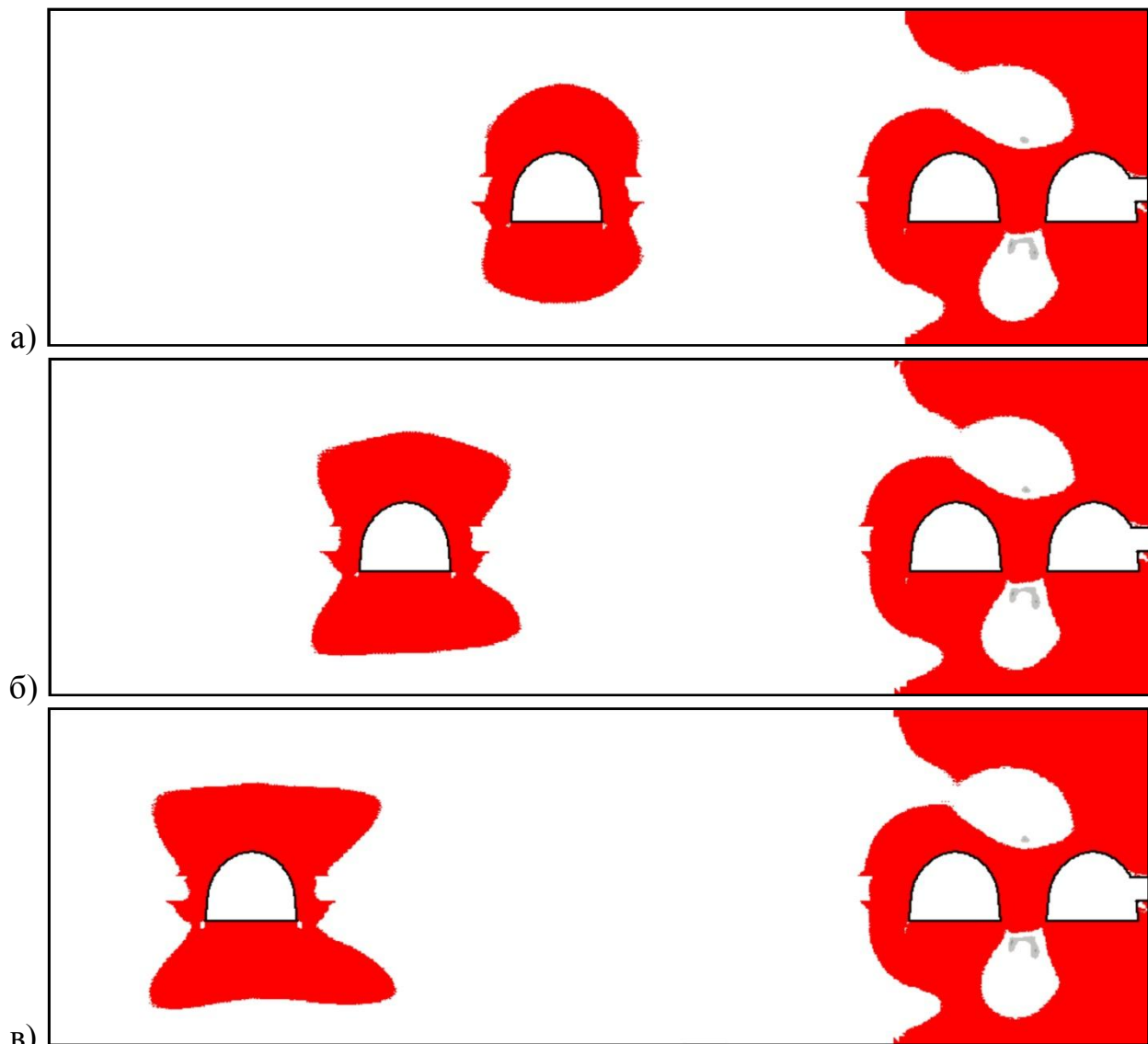


Рисунок 2 – Распределение значений параметра Q^*

Выработанное пространство справа и выработку № 1 окружают области на-

рушенных пород, где разнокомпонентность поля напряжений очень высока ($Q^* > 1,6$). При ширине целика 20 м эти области связаны между собой менее нарушенной зоной, в которой $1,2 > Q^* > 0,8$, рис. 3а. В двух других случаях, при большей ширине целика, рис. 3б и 3в, между нарушенными породами вокруг выработанного пространства и выработки № 1, находится перемычка из ненарушенных пород, сохраненных в монолитном состоянии ($Q^* < 0,4$). Ширина этой перемычки растет с увеличением расстояния между выработками № 1 и № 2.

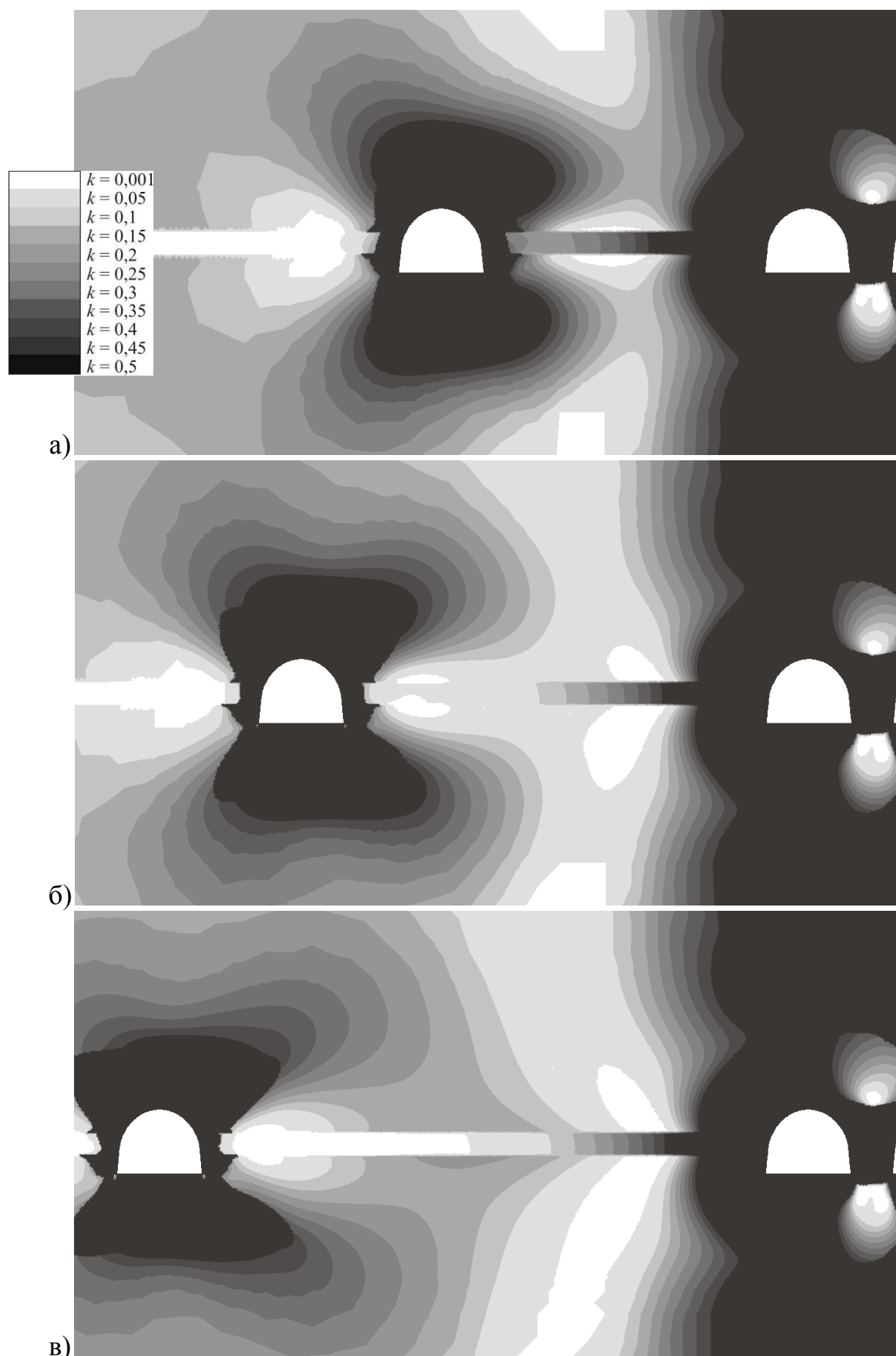


а) ширина целика – 20 м; б) 30 м; в) 40 м

Рисунок 3 – Зоны неупругих деформаций

Зоны неупругих деформаций, рис. 3, указывают на возможность разрушения пород вокруг выработки № 1 и выработанного пространства.

По результатам геомеханических расчетов вычислены коэффициенты проницаемости в исследуемой области, рис. 4, затем – давление и расход газа.



а) ширина целика – 20 м; б) 30 м; в) 40 м

Рисунок 4 – Проницаемость углепородного массива

При ширине целика $L_{ц}=20$ м, рис. 4 а, 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 $L_{ц}=30$ м, рис. 4 б, области фильтрации вокруг выработки № 1 и выработанного пространства практически не связаны, между ними находится непроницаемая перемычка – область, проницаемость пород в которой приблизительно равна нулю. В этом случае, при аналогичных граничных условиях, фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1 невозможна.

При $L_{ц}=40$ м, рис. 4 в, 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. 1.

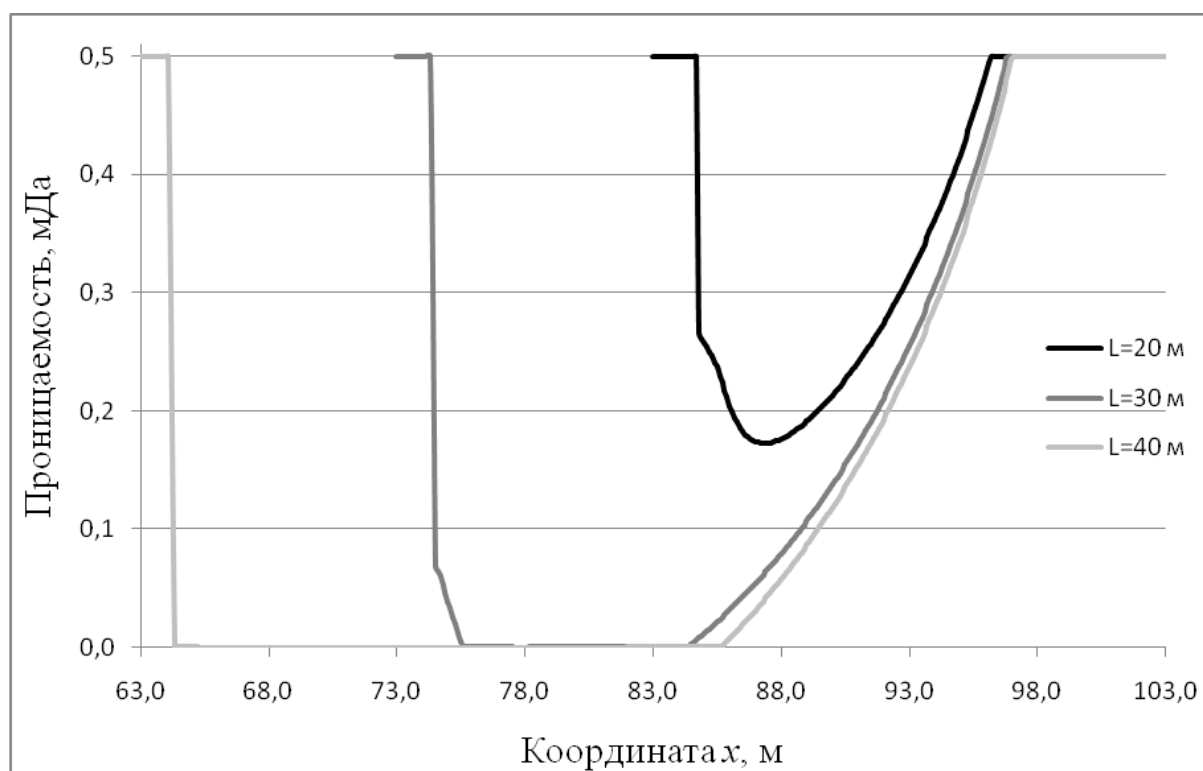


Рисунок 5 – Проницаемость по угольному пласту при различной ширине целика $L_{ц}$

Таблица 1 – Координаты целика по оси x

Ширина целика, $L_{ц}$, м	Координата x_1 , м	Координата x_2 , м
20	83	103
30	73	103
40	63	103

Видно, что при $L_{ц} = 20$ м на всем протяжении целика проницаемость угольного пласта $k > 0$, что означает возможность фильтрации газа через него. При определенном значении перепада давления в выработках № 1 и № 2 возможна фильтрация газа из выработки № 2 в выработку № 1. При $L_{ц} = 30$ м на участке длиной 9 м угольный пласт непроницаем, $k = 0$. Фильтрация газа из одной выработки в другую невозможна. При $L_{ц} = 40$ м угольный пласт непроницаем на еще большем промежутке длиной 21 м. Фильтрация газа из одной выработки в другую невозможна.

Результаты расчета удельного дебита газа Q в выработки № 1 и № 2 при различных значениях перепада давления ΔP в них и при ширине целика 20 м показаны на рис. 6. Отрицательные значения Q означают приток газа в выработку, положительные – отток.

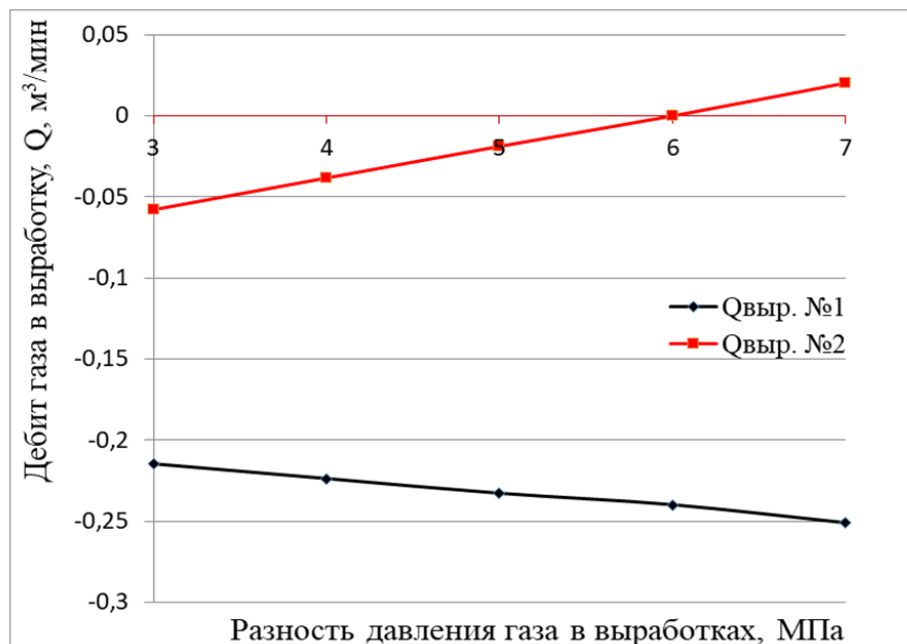


Рисунок 6 – Метановыделение в выработки

При увеличении депрессии ΔP удельное газовыделение в выработку № 1 растет. С увеличением ΔP удельное газовыделение в выработку № 2 снижается до 0, затем начинается переток газа из выработки № 2 и выработанного пространства в выработку № 1.

Выводы. Разработана математическая модель фильтрации пожарных газов через барьерные целики в зависимости от напряженного состояния углепородного массива, а также конечно-элементные модели участков углепородного массива с горными выработками, между которыми оставлены барьерные целики различной ширины.

С применением метода конечных элементов выполнен расчет поля напряжений и зон неупругих деформаций для 3 случаев: ширина целика между выработками составляет 20, 30 и 40 м. С использованием результатов геомеханических расчетов вычислены коэффициенты проницаемости, распределения давле-

ния и расхода газа в исследуемой области. Построены графики изменения проницаемости целиков.

Показано, что при ширине целика 20 м области фильтрации вокруг изолированного пространства и действующей выработки связаны и по угольному пласту, и по вмещающим породам. При определенном значении перепада давления возможна фильтрация пожарных газов из изолированного пространства в действующую выработку. При ширине целика 30 м области фильтрации вокруг изолированного пространства и действующей выработки практически не связаны, между ними находится непроницаемая зона. В этом случае фильтрация газа через барьерный целик маловероятна. При ширине целика 40 м протяженность непроницаемой перемычки увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка концентраций индикаторных газов в очистных забоях ШУ «Покровское» / С.П. Минеев, В.Н. Кочерга, А.С. Янжула и др. / Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАН Украины, 2017. № 133. С. 148-157.
2. 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.
3. Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams. / S. Durucan, T.S. Daltaban, J.Q. Shi, L. Foley / 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. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2005. № 57. С. 3-12.
5. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в угленосном массиве при ведении горных работ / Геотехническая механика. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2015. № 121. С. 48-99.
6. Zienkiewicz O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. Т. 1. 690 p.
7. Hutton D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis. – McGraw-Hill, 2004. 505 p.

REFERENCES

1. Myneev, S.P., Kocherha, V.N., Yanzhula, A.S. et al. (2017), "Evaluation of concentrations of indicating gases in clearing slaughtering of mine management "Pokrovskoye", *Geo-Technical Mechanics*, no. 133, pp. 148-157.
2. 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.
3. Durucan, S., Daltaban, T.S., Shi, J.Q., Foley, L. (1993), "Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams", *Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, Alabama, pp. 453-460.
4. Bulat, A.F., Krukovska, V.V. (2005), "Computer simulation of methane filtration in undermining massif in three-dimensional statement", *Geo-Technical Mechanics*, no. 57, pp. 3-12.
5. Krukovska, V.V. (2015), "Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations", *Geo Technical Mechanics*, no. 121, pp. 48-99.
6. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000), "The finite element method", Butterworth-Heinemann.
7. Hutton, D.V. (2004), "Fundamentals of Finite Element Analysis", McGraw-Hill.

Об авторах

Круковский Александр Петрович, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, igtm@ua.fm.

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), Днепр, Украина, igtm@ukr.net.

About the authors

Krukovskyi Olexandr Petrovych, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Deputy Director of the institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, igtm@ua.fm.

Krukovska Viktoriia Viktorivna, 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

Анотація. Під час пожеж у вугільних шахтах різко змінюється склад атмосфери: знижується вміст кисню і збільшується вміст діоксиду вуглецю, оксиду вуглецю, водню та інших газів. Згідно з нормативними вимогами очисні роботи поблизу пожежної ділянки необхідно вести з залишенням бар'єрних ціликів. Розрахунок їх ширини необхідно виконувати виходячи з двох умов - забезпечення стійкості і газової непроникності. Метою роботи є дослідження фільтраційної проникності вуглепородного масиву з ізольованою ділянкою діючої підготовчої виробки і бар'єрним цілком в залежності від його напруженого стану.

Розроблено кінцево-елементні моделі вуглепородного масиву з гірничими виробками, між якими залишені бар'єрні цілики різної ширини. Із застосуванням методу кінцевих елементів виконано розрахунок полів напружень та областей непружних деформацій для 3 випадків: ширина цілика між виробками складає 20, 30 і 40 м. З використанням результатів геомеханічних розрахунків розраховані поля коефіцієнтів проникності, розподілу тиску і витрати газу в досліджуваній області. Побудовано графіки зміни проникності ціликів.

Показано, що при ширині цілика 20 м області фільтрації навколо ізольованого простору і діючої виробки пов'язані і по вугільному пласту, і по вміщуючих породах. При певному значенні перепаду тиску можлива фільтрація пожежних газів з ізольованого простору в діючу виробку. При ширині цілика 30 м області фільтрації навколо ізольованого простору і діючої виробки практично не пов'язані, між ними знаходиться непроникна зона. В цьому випадку фільтрація газу через бар'єрний цілик малоімовірна. При ширині цілика 40 м протяжність непроникною перемички збільшується.

Ключові слова: напружений стан, фільтраційна проникність, пожежні газу, бар'єрний цілик.

Annotation. During fires, composition of atmosphere in the coalmines is changed drastically: content of oxygen decreases, while content of carbon dioxide, carbon monoxide, hydrogen and of other gases increases. According to the regulatory requirements, coal-face operations near the fire area can be performed only with remained barrier pillars, whose width should be calculated with two ensured conditions: pillars stability and gas impermeability. In the article, a numerical study of stress state and filtration permeability is performed for the coal-rock massif with isolated area, active mine working and barrier pillar.

Finite-element models of the coal-rock massif with mine workings, between which barrier pillars with different widths are remained, are developed. With the help of finite element method, stress fields and zones with inelastic deformation were calculated. Calculations were performed for three widths of the pillars installed between the mine workings: 20 m, 30 m and 40 m. Based on geomechanical calculations, fields of permeability coefficients, distributions of gas pressure and gas leaks in the area under the study were calculated. Graphs of pillar permeability change in the undisturbed zone and tectonically disturbed zone were constructed.

It is shown that with pillar width of 20 m, filtration areas around the isolated space and active working are connected with both the coal seam and enclosing rock. At a certain rate of pressure drop, fire gas filtration from the isolated space into the active working is possible. When width of pillar is 30 m, filtration areas around the isolated space and mine working are not connected: there is an impermeable zone between them. In this case, gas filtration through the barrier pillar is hardly possible. When width of pillar was 40 m, length of impermeable zone was increased.

Keywords: stress state, filtration permeability, fire gas, barrier pillar.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Мінським С.П.