

NUMERICAL SIMULATION OF THE STRESS STATE OF THE LAYERED GAS-BEARING ROCKS IN THE BOTTOM OF MINE WORKING

¹*Krukovskyi O.P., ¹Krukovska V.V.*

¹*Institute of Geotechnical Mechanics named N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШАРУВАТОГО ГАЗОНОСНОГО МАСИВУ В ПІДОШВІ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

¹*Круковський О.П., ¹Круковська В.В.*

¹*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО ГАЗОНОСНОГО МАССИВА В ПОЧВЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

¹*Круковский А.П., ¹Круковская В.В.*

¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

Annotation. An analysis of the state of mine workings of the deep mines of Donbass shows that a significant part of them are in unsatisfactory condition due to intense heaving of floor rocks. If there are one or more layers of strong rocks on the more pliable rocks, then sudden destruction of working floor can occur. Cracks that form in the floor can reach gas-bearing rocks and coal seams. Then there is a breakthrough of methane into the mine, which leads to the gasification of the mine atmosphere, injuries to miners, increasing the cost of maintaining the mine. To prevent such negative consequences it is necessary to study the coupled processes of deformation of the layered gas-bearing rocks and methane filtration. The aim of the work is to numerically simulate the rocks stress state around a mine, provided that strong and pliable gas-bearing rocks alternate in its floor. The mathematical model has been developed for the coupled processes of the rock massif deformation and gas filtration in a disturbed area around mine working, in the bottom of which there are hard and soft gas-bearing rocks. At each time iteration, the influence of the stress field on the formation of the filtration area, the influence of change in gas pressure on the stress state of rocks are taken into account. The finite element method was used to solve the problem. There are calculation results of the displacements, stresses and pressures of methane in the studied area in the paper. It is shown that the difference in the physical and mechanical properties of the bottom rocks of mine working causes the non-uniform distribution of geomechanics and filtration parameters. In more strong sandstone, the stresses concentration increases. Therewith, an intensive process of fractures formation takes place in the argillite and the coal. Methane from the upper part of the gas-bearing sandstone is filtered into the mine working; the destruction of the coal interlayer is accompanied by release of methane and its accumulation under the layer of a strong sandstone. The development of a zone of inelastic deformations leads to the destruction of sandstone. In case of brittle destruction, with the formation of fractures of a certain length, a breakthrough of methane may occur out of the bottom into mine working.

Keywords: deformation of the rocks, stress state of the rocks, coupled processes, gas filtration, brittle destruction.

Introduction. The analysis of the deep Donbas mines work shows that a significant part of the preparatory mine workings is in unsatisfactory state caused by the intensive bottom rocks swelling [1]. The upheaving of the bottom in the preparatory mine workings sometimes reaches 1.5 m, depending on the technology of their fastening and geometrical dimensions [2]. The sudden destructions of bottom rocks occur when one or more layers of hard rocks lie over more pliable rocks. The mechanism of deforming the strong rock layers is in the elastic bending into the cavity of mine working with the subsequent fault and the formation of a longitudinal fracture along the mine working. The destruction occurs either near the boundaries of

mine working, or in its central part, which is confirmed by the study of cases of bottom rocks sudden destruction [3, 4]. The growth of fractures is the main factor leading to the deformation and destruction of the rock massif around the mine working. To describe this process, a number of models of fractures initiation and development have been developed [5, 6]. If the fractures which are formed in the bottom reach the gas-bearing strata, a breakthrough of methane occurs into mine working, which leads to an excessive gasification of the mine environment, miners' injury, and an increase in the cost for maintaining the mine working.

To prevent such negative consequences, it is necessary to comprehensively study the connected processes of the layered gas-bearing rocks deformation and methane filtration, which is possible only with the use of numerical methods. In this regard, the purpose of the work is the computational modelling of the stress state of the rock massif around the mine working provided the alternation of strong and soft gas-bearing rocks in its bottom.

Methods. The coupled processes of the rock massif deformation and gas filtration in a disturbed area are described by a system of equations [7-9]:

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

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

$$k = \begin{cases} 0 & \text{for } Q^* < 0.7; P^* > 0.25; \\ k_{\min} & \text{for } 0.7 < Q^* < 0.8; \\ e^{0.26Q^* - 4.65} & \text{for } Q^* > 0.8; P^* > 0.1; \\ k_{\max} & \text{for } Q^* > 0.8; P^* < 0.1, \end{cases}$$

where c_g – the damping coefficient, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; u_i – the displacements, m; $\sigma_{ij,j}$ – the derivatives of the stress tensor components along x , y , Pa/m ; $X_i(t)$ – the projections of the external forces acting on the volume unit of a solid body, N/m^3 ; $P_i(t)$ – the projections of forces due to gas pressure in the porous fractured space, N/m^3 ; p – the gas pressure, Pa; k – the permeability coefficients, D; m – porosity; μ – gas viscosity, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $q(t)$ – the gas release function; $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$ – the parameter characterizing the diversity of the stress field components; $P^* = \sigma_3 / \gamma H$ – the parameter characterizing the unloading of rocks from the rock pressure; σ_1 , σ_3 – maximum and minimum components of the principal stress tensor; γ – the averaged weight of the overlying mine rocks, N/m^3 ; H – the mining depth, m.

The problem is solved in an elastic-plastic formulation. For the mathematical description of the process of rocks changeover into a disturbed state, the Mohr-Coulomb failure theory is applied. The initial and boundary conditions for the task set:

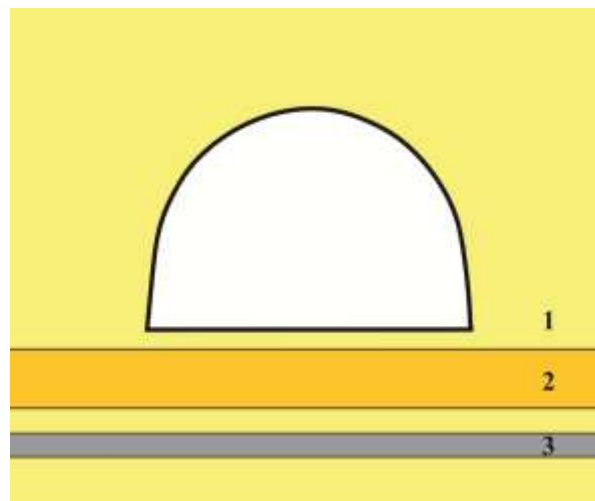
$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \quad u_x|_{t=0} = 0; \quad u_y|_{t=0} = 0; \quad p|_{t=0} = p_0;$$

$$u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0; \quad p|_{\Omega_1 \text{ and } \Omega_2} = p_0; \quad p|_{\Omega_3(t)} = p_0; \quad p|_{\Omega_4} = 0.1 \text{ MPa},$$

where λ – the side thrust coefficient; p_0 – the methane pressure in the virgin massif, MPa; Ω_1 – the vertical boundaries of the outer contour; Ω_2 – the horizontal boundaries of the outer contour; $\Omega_3(t)$ – the time-varying boundary of the filtering area; Ω_4 – the internal contour (mine working).

The problem is solved by the finite element method.

Let us consider the mine working with an arch section of 15 m² (width 5.2 m, height 3.7 m), in the bottom of which the sandstone with a thickness of 1.0 m and the coal interlayer with a thickness of 0.4 m occur, Figure 1. The host rock is argillite. The properties of rocks are represented in Table 1.



1 – argillite; 2 – sandstone; 3 – coal.

Figure 1 – The scheme of the rock layers’ location in the bottom of mine working

Table 1 – Mechanical parameters of rock

Rock	Axial compressive strength, σ_c , MPa	Deformation modulus, E , MPa	Poisson’s ratio of rock mass	Cohesion, C , MPa	Friction angle, deg	Gas content, m ³ /t
Argillite	25	11·10 ³	0.32	7.5	28	-
Sandstone	46	18·10 ³	0.35	12	35	7
Coal	16	3·10 ³	0.25	4.5	32	15

Results and discussion. As a result of modeling, the stresses fields have been obtained, the values of geomechanics parameters Q^* and P^* , and the inelastic deformations zone at different time iterations, Figure 2. The mine working development initiates the process of the stresses field redistribution in the host rocks. An area of increased diversity of the stresses field components begins to form around the mine working. At the first time station in the border areas of the mine working bottom, $Q^* < 1.2$, Figure 2a, in the central sandstone part – $Q^* < 0.7$, Figure 3; the

parameter P^* values in the central part of sandstone exceed 0.1, Figure 4, which indicates the elastic deformation.

Over time, the area of diversity of the stresses field components increases in size with a gradual increase in the parameter Q^* values and a decrease in the parameter P^* , Figure 2b, 2c, 3, 4. The difference in the physical and mechanical properties of the bottom rocks in mine working causes the non-uniform distribution of geomechanics parameters: in the more strong sandstone, the stresses concentration increases, in its central part $1.2 < Q^* < 1.6$, in border parts – $Q^* > 1.6$. At the same time in the argillite and in the coal $Q^* < 1.0$, Figure 3b.

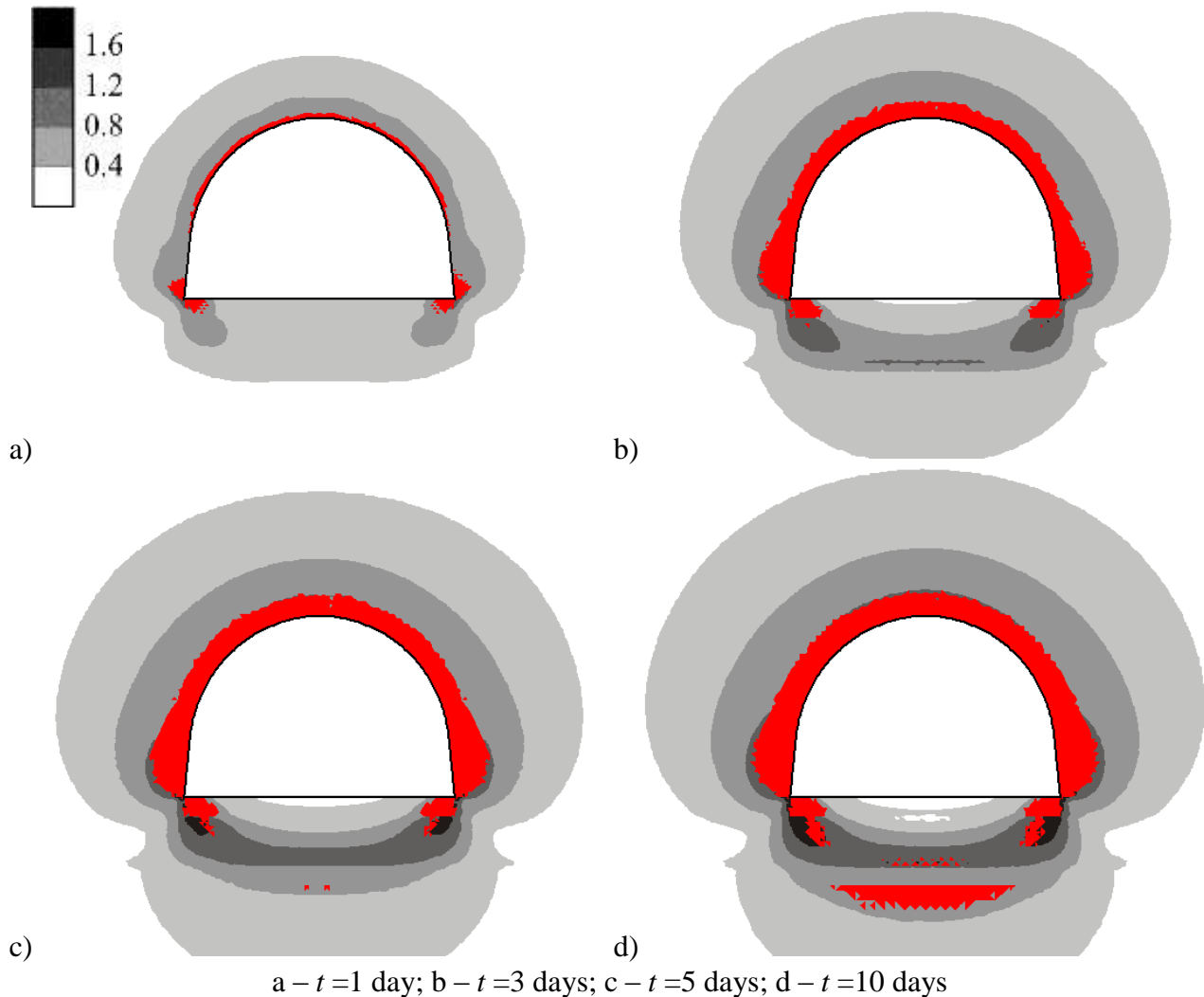
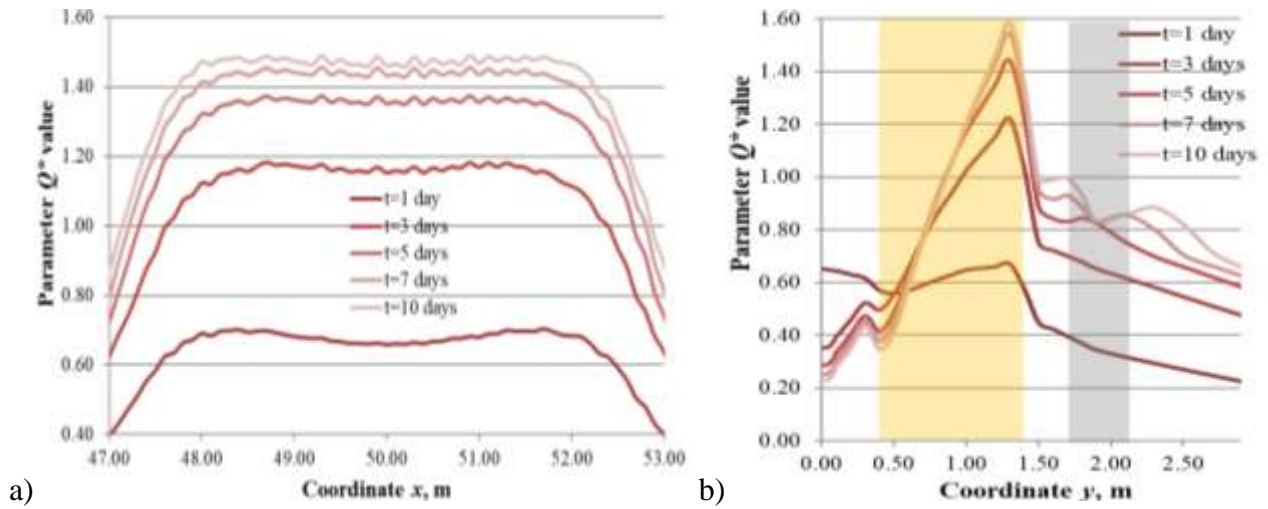


Figure 2 – The distribution of parameter Q^* values and inelastic deformation zones at different time stations

The mine working contour is surrounded by the zone of inelastic deformations, shown in red in Figure 2, in which the process of fractures formation leads to stratification and destruction of border rocks.

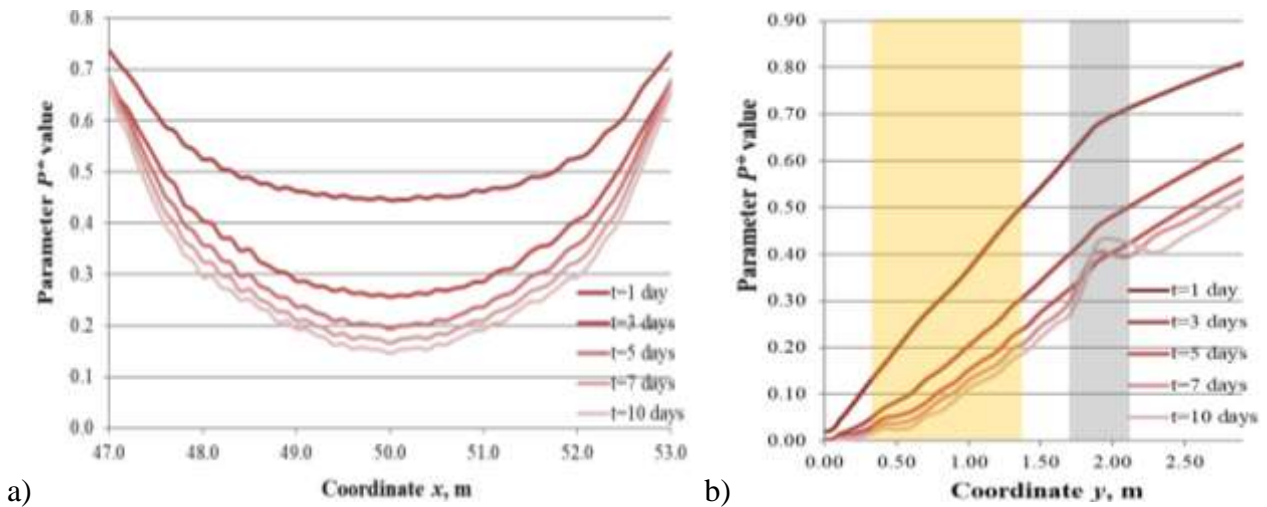
The further redistribution of the stresses field, Figure 2d, leads to the fulfilment of the criterion of the Mohr-Coulomb failure theory and the destruction of coal and argillite under the layer of sandstone in the mine working bottom. In the border and

central areas of the sandstone, the values of parameter $Q^* > 1.4$, Figure 3. Here, the development of the inelastic deformations zone begins, which leads to its destruction. Such destruction may occur in the form of the formation of fractures with the appropriate depth.



a – along a horizontal axis passing through the sandstone; b – along a vertical axis passing through the mine working centre

Figure 3 – Changing the parameter Q^* values in the mine working bottom



a – along a horizontal axis passing through the sandstone; b – along a vertical axis passing through the mine working centre

Figure 4 – Changing the parameter P^* values in the mine working bottom

The graphs of vertical displacements of rocks in the mine working bottom, Figure 5, show that the different rock layers move in a non-uniform manner. That is, the deformation of the rocks in the mine working bottom occurs with an increase in the volume of geomaterial, causing the processes of stratification and fractures formation.

The influence of increase in the mine rocks volume on the filtration permeability growth was considered when calculating the parameters of methane filtration in the

disturbed area around the mine working. The change in the relative gas pressure (p/p_0) at different time iterations is shown in Figure 6.

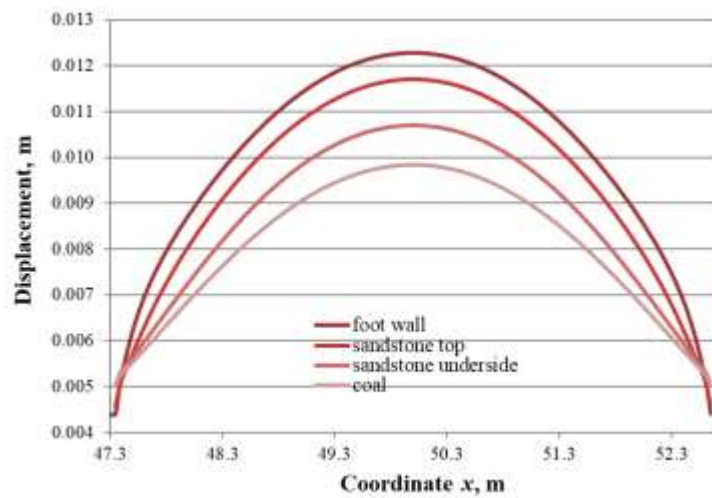
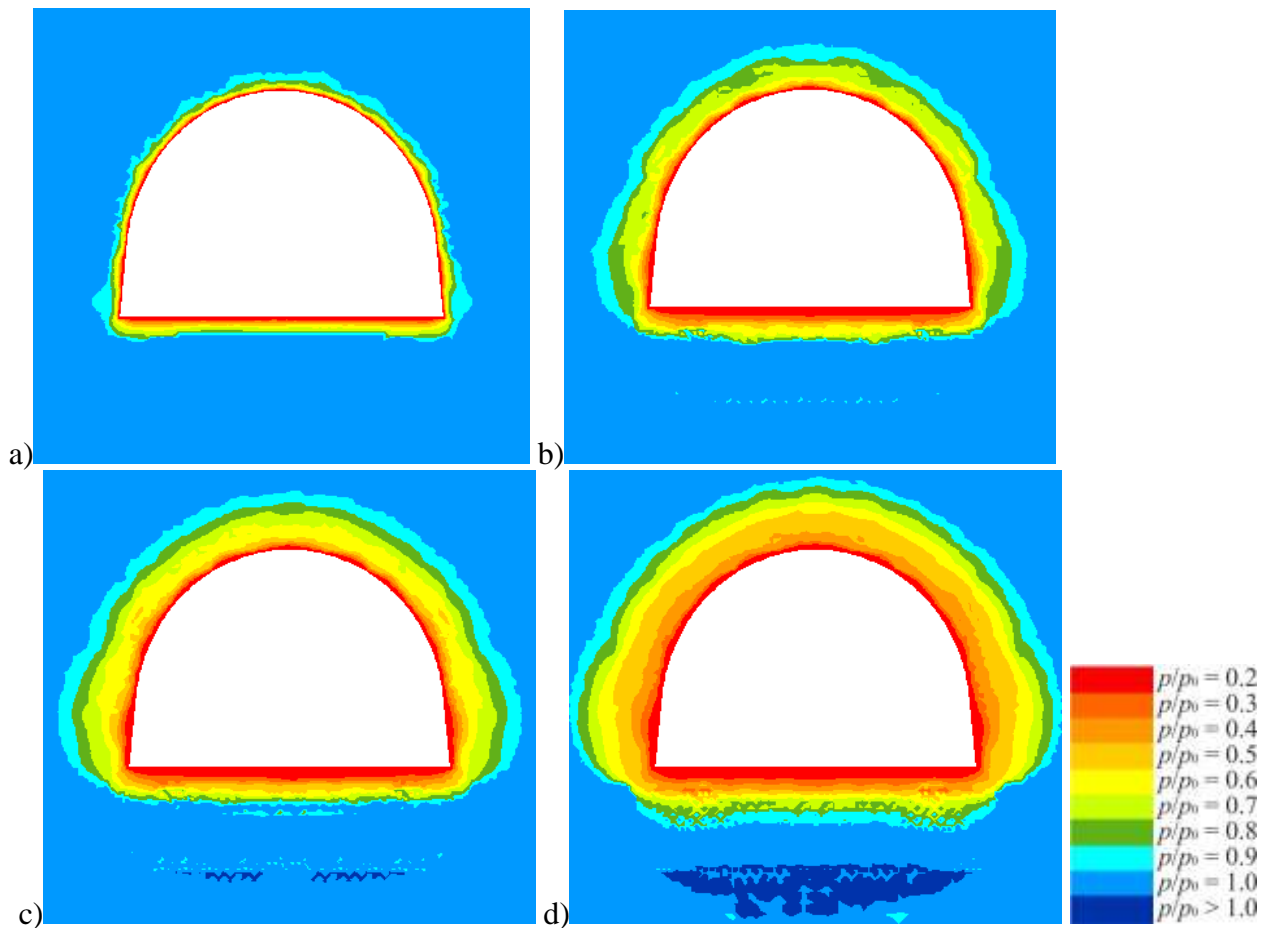


Figure 5 – The vertical displacements of rock layers at $t = 10$ days



a – $t = 1$ day; b – $t = 3$ days; c – $t = 5$ days; d – $t = 10$ days

Figure 6 – The relative gas pressure at different time stations

Beginning from the 3rd day, the gas pressure in the upper part of the gas-bearing sandstone decreases, Figure 6b. This indicates that methane is moved from the areas

with a higher pressure to an area where the pressure is minimal – into the mine working environment. Thus, the process of methane filtration occurs.

The destruction of coal (Fig. 2d) is accompanied by the release of methane and its accumulation under the layer of strong sandstone (areas $p/p_0 > 1.0$), Figure 6d.

In the considered time interval, the area of decreased pressure ($p/p_0 < 1.0$) does not affect the coal interlayer, which is located under the sandstone. Methane from this source of gas release does not penetrate into the mine working, as it is prevented by non-permeable lower part of the sandstone. Subsequently, in the case of a gradual expansion of the permeable area in the mine working bottom, the process of filtration will continue in a quasi-stationary mode. And with the brittle destruction of the sandstone, there will be a breakthrough of methane out of the bottom into mine working.

Conclusions. The mathematical model has been developed for the coupled processes of the rock massif deformation and gas filtration in a disturbed area around mine working, in the bottom of which there are hard and soft gas-bearing rocks. By means of the finite element method, the fields of displacements, stresses, permeability coefficients and methane pressure in the studied area have been calculated.

It is shown that the difference in the physical and mechanical properties of the bottom rocks of mine working causes the non-uniform distribution of geomechanics parameters. In more strong sandstone, the stresses concentration increases in its central and border parts. Therewith, an intensive process of fractures formation takes place in the argillite and the coal. Methane from the upper part of the gas-bearing sandstone is filtered into the mine working, the destruction of the coal interlayer is accompanied by release of methane and its accumulation under the layer of a strong sandstone.

At a certain point of time, the development of a zone of inelastic deformations leads to the destruction of sandstone. Such destruction may occur in the form of the formation of fractures to a depth of sandstone thickness. In case of brittle destruction of the sandstone, there may occur a breakthrough of methane out of the bottom into mine working. With a gradual expansion of the permeable area in the mine working bottom, the process of filtration will continue in a quasi-stationary mode.

REFERENCES

1. Solovev, G.I. and Negrey, S.G. (1999), "About the features of soil heaving of the extracting working in the conditions of mine «Yuzhnodonbasskaia No 3»", *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta*, no. 3, pp. 38-42
2. Instruksiya po prognozu i preduprezhdeniyu vnezapnyh proryivov metana iz pochvyi gorniyh vyirabotok [Instruction on a prognosis and warning of sudden breaches of methane from soil of the msne working. Ministry of coal industry of Ukrainian SSR] (1987), Makeevka-Donbass, MaksRI, SU.
3. Kiselev, N.N., Ashihmin, V.D., Radchenko, A.G. and Cheperina, T.A. (2012), « Sudden destructions of soil rocks with the breaches of methane during conducting of the capital working », *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy*, no. 11, pp. 319-330.
4. Kasyanenko, A.L., Solovev, G.I., Rodzyn S.V. and Moroz, Yu.M. (2011), « Research of stability of durable rocks of soil on a mine named by Ye.T. Abakumov SE «Donetsk coal power company» », *Sovershenstvovanie tehnologii stroitelstva shaht i podzemnyih sooruzheniy*, no. 17, pp. 190-191.
5. H. Molladavoodi, A. Mortazavi (2011), « A damage-based numerical analysis of brittle rocks failure mechanism », *Finite Elem Anal*, vol. 47
6. N. Xie, Q.Z. Zhu, L.H. Xu, J.F. Shao (2011), « A micromechanics-based elastoplastic damage model for quasi-brittle rocks », *Comput Geotech*, vol. 38 .

7. Krukovskiy, O.P. (2011), « Modelling changes of stress-strain state of solid edge during the distance of working face of mine workings », *Problems of computational mechanics and strength of structures*, no. 17, pp. 175-181.
8. Basniev, K.S., Kochina, I.N., Maksimov, V.M. (1993). *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics], Nedra, Moscow, RU.
9. 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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловьев, Г.И., Негрей С.Г. Об особенностях пучения почвы выемочных выработок в условиях шахты «Южнодонбасская №3» // Известия Донецкого горного института, 1999. №3. С. 38-42.
2. Инструкция по прогнозу и предупреждению внезапных прорывов метана из почвы горных выработок. Министерство угольной промышленности Украинской ССР, Государственный Макеевский ордена Октябрьской Революции научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. Макеевка-Донбасс, 1987. 29 с.
3. Киселев Н.Н., Ашихмин В.Д., Радченко А.Г., Чеперина Т.А. Внезапные разрушения пород почвы с прорывами метана при проведении капитальных выработок // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2012. № 11. С. 319-330.
4. Касьяненко А.Л., Соловьев Г.И., Родзин С.В., Мороз Ю.М. Исследование устойчивости прочных пород почвы на шахте им. Е.Т. Абакумова ГП «Донецкая угольная энергетическая компания» // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. Сб. науч. тр. Донецк: «Норд – Пресс», 2011. Вып. 17. С. 190-191.
5. H. Molladavoodi, A. Mortazaviu A damage-based numerical analysis of brittle rocks failure mechanism // *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011. № 47(9). Pp. 991-1003.
6. N. Xie, Q.Z. Zhu, L.H. Xu, J.F. Shao A micromechanics-based elastoplastic damage model for quasi-brittle rocks // *Computers and Geotechnics* 2011. Vol. 38. P. 970-977.
7. Круковский, О.П. Моделивання зміни напружено-деформованого стану приконтурного масиву при відході забою гірничої виробки // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій 2011. № 17. С. 175-181.
8. Басниев, К.С., Кочина И.Н., Максимов В.Н. Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с.
9. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в угленосном массиве при ведении горных работ // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2015. № 121. С. 48-99.

About the authors

Krukovskiy Oleksandr Petrovych, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Deputy Director of the institute, Institute of Geotechnical Mechanics named N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ua.fm

Krukovska Viktoriia Viktorivna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics named N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net

Об авторах

Круковський Олександр Петрович, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, заступник директора інституту з наукової роботи, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, igtm@ua.fm

Круковська Вікторія Вікторівна, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу керування динамічними проявами гірського тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, igtm@ukr.net

Анотація. Аналіз стану підготовчих виробок глибоких шахт Донбасу показує, що значна їх частина знаходиться в незадовільному стані через інтенсивне здимання порід підшви. Якщо один або кілька шарів міцних порід лежать на більш піддатливих породах, відбуваються раптові руйнування порід підшви виробки. Утворені в підшві тріщини можуть сягати газоносних порід і пластів вугілля. Тоді відбувається прорив метану в виробку, що призводить до загазованості рудничної атмосфери, травмування гірників, збільшення витрат на підтримку виробки. Для запобігання подібних негативних наслідків необхідне дослідження зв'язаних процесів деформування шаруватого вугленосного масиву і фільтрації метану. Метою роботи є чисельне моделювання напруженого стану породного масиву навколо гірничої виробки за умови чергування міцних і слабких газоносних порід в її підшві. Розроблено математичну модель зв'язаних процесів деформування породного масиву і фільтрації газу в порушеній області навколо гірничої виробки, в підшві якої розташовані міцні і слабкі газоносні породи. На кожній часовій ітерації враховується вплив поля напружень на формування області фільтрації, вплив зміни тиску газу на напружений стан порід. При розв'язанні задачі використовувався метод скінченних елементів. У статті наведені результати розрахунку переміщень, напружень і тиску метану в досліджуваній області. Показано, що відмінність фізико-механічних властивостей порід підшви виробки обумовлює нерівномірність розподілу геомеханічних і фільтраційних параметрів. У більш міцному пісковіку зростає концентрація напружень. При цьому в аргіліті і вугіллі відбувається процес інтенсивного тріщиноутворення. Метан з верхньої частини газоносного пісковика фільтрується в виробку, руйнування вугільного прошарку супроводжується виділенням метану та накопиченням його під шаром міцного пісковика. З часом розвиток зони непружних деформацій

призводить до руйнування пісковика. При крихкому руйнуванні з утворенням тріщини певної довжини може статися прорив метану з підшви в виробку.

Ключові слова: деформування породного масиву, напружений стан породного масиву, зв'язані процеси, фільтрація газу, крихке руйнування.

Анотація. Аналіз состояния подготовительных выработок глубоких шахт Донбасса показывает, что значительная их часть находится в неудовлетворительном состоянии из-за интенсивного пучения пород почвы. Если один или несколько слоев прочных пород лежат на более податливых породах, происходят внезапные разрушения пород почвы. Образующиеся в почве трещины могут достигать газоносных пород и пластов угля. Тогда происходит прорыв метана в выработку, что приводит к загазированию рудничной атмосферы, травмированию горнорабочих, увеличению затрат на поддержание выработки. Для предотвращения подобных негативных последствий необходимо исследование связанных процессов деформирования слоистого углепородного массива и фильтрации метана. Целью работы является численное моделирование напряженного состояния породного массива вокруг горной выработки при условии чередования прочных и слабых газоносных пород в ее почве. Разработана математическая модель связанных процессов деформирования породного массива и фильтрации газа в нарушенной области вокруг горной выработки, в почве которой расположены прочные и слабые газоносные породы. На каждой временной итерации учитывается влияние поля напряжений на формирование области фильтрации, влияние изменения давления газа на напряженное состояние пород. При решении задачи использовался метод конечных элементов. В статье приведены результаты расчета перемещений, напряжений и давления метана в исследуемой области. Показано, что различие физико-механических свойств пород почвы выработки обуславливает неравномерность распределения геомеханических и фильтрационных параметров. В более прочном песчанике нарастает концентрация напряжений. При этом в аргиллите и угле происходит процесс интенсивного трещинообразования. Метан из верхней части газоносного песчаника фильтруется в выработку, разрушение угольного пропластка сопровождается выделением метана и накоплением его под слоем прочного песчаника. Развитие зоны неупругих деформаций со временем приводит к разрушению песчаника. При хрупком разрушении с образованием трещины определенной длины может произойти прорыв метана из почвы в выработку.

Ключевые слова: деформирование породного массива, напряженное состояние породного массива, связанные процессы, фильтрация газа, хрупкое разрушение.

Стаття надійшла до редакції 25.06. 2019

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.І. Скіпочкою