

УДК 622.841:622.833.5:622.281.74 <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.008>

ЗМІНА ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ НАВКОЛО ГІРНИЧИХ ВИРОБОК В ЗОНІ ВПЛИВУ ТЕКТОНІЧНОГО ПОРУШЕННЯ

Ю.О. Виноградов¹

¹Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

Відповідальний автор: e-mail: my_pochta_1r@ukr.net

CHANGE IN THE PARAMETERS OF WATER FILTRATION AROUND MINE WORKINGS IN THE AREA OF INFLUENCE OF TECTONIC FAULTS

Y.O. Vynohradov¹

¹Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Corresponding author: e-mail: my_pochta_1r@ukr.net

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the work is research of the water inflow into the mine working that driving in difficult hydrogeological conditions at the crossing of tectonic displacement.

Methods. A method for studying the state of layered rocks with a mine working in the presence of watered layers in its vicinity, previously developed by the author, as well as the finite element method were used to solve the problem of water filtration in a deformable rocks.

Findings. In this work, the problem of water inflow reduction in Ukrainian coal mines, which are distinguished by difficult hydrogeological conditions, was considered. A numerical study of the change in water inflow into a mine working when it crosses a tectonic fault was carried out. The calculation of stress fields, zones with inelastic deformations and coefficients of permeability, which depend on the stress state and takes into account tectonic and natural permeability of the rocks, was performed. The results of calculating the water pressure and water inflow into the mine working in all considered cases are presented in the article. Analysis of the calculated data showed that a disturbed area, which covered water-bearing ricks, was formed in the roof of the mine working with the frame support. Within this area, water can move towards the contour of the mine working. The filtration permeability of the host rocks increases significantly when the mine face approaches the tectonic disturbance. The flow rate of water reaches critical values.

Originality. For the first time, the modelling of water inflows into the mine workings in the zone of influence of tectonic fault was performed. It is shown that when the mine working approaches the fault, the processes of deformation and

destruction of the host rocks are activated and, with time, capture the adjacent aquifers. Then the flow of water into the working from these aquifers begins, and the frame support is not able to contain these processes.

Practical implications. The developed mathematical model of the coupled processes of deformation of rocks with aquifers and water filtration can be used to study water inflows in various geological conditions.

Keywords: water inflow into mine working, rock permeability, water filtration, numerical simulation

1. ВСТУП

Гідрогеологічна структура Західного Донбасу – це система водоносних горизонтів і комплексів, що охоплюють всю товщу осадових порід і верхню частину тріщинуватої зони кристалічних порід. Загальна потужність обводнених порід становить від 20 м до 1660 м і більше [1]. Обводнення виробок у вугільних шахтах головним чином залежить від особливостей геологічної будови шахтних полів, зокрема від тектонічної порушеності порід, кількості водоносних горизонтів, їх потужності, напору, фільтраційної проникності [1-3]. Наприклад, в шахті ім. М.І. Сташкова – найбільш обводненій в Західному Донбасі – водоприплив становить 1640 м³/год. При зволоженні приконтурних порід відбувається їх розмокання і зниження міцності. Це призводить до втрати стійкості виробок і додаткових витрат на відкачування води і підтримку виробок [4].

Вугільні шахти України відрізняються складними гірничо-геологічними умовами, наявністю великої кількості обводнених порід. В результаті приконтурні породи розмокають і втрачають властивості міцності, що значно ускладнює проведення та експлуатацію гірничих виробок, знижує їх стійкість.

Тому необхідно докладне вивчення, дослідження і моделювання геомеханічних і фільтраційних процесів, які відбуваються при проведенні виробок в складних гідрогеологічних умовах. Виявлення особливостей та закономірностей протікання цих процесів дозволить розробити і поліпшити способи підвищення стійкості виробок протягом терміну експлуатації і безпеки ведення гірничих робіт.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Деформування вуглепородного масиву можна описати рівнянням:

$$c_g \frac{\partial u_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t), \quad (1)$$

де u_i – переміщення, м; c_g – коефіцієнт демпфування, кг/с/м³; $\sigma_{ij,j}$ – похідні від компонент тензора напружень по x, y , МПа/м; t – час, с; $X_i(t)$ – проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму твердого тіла, Н/м³, $P_i(t)$ – проекції сил, обумовлених тиском флюїдів в тріщинно-поровому просторі, Н/м³.

Деформація порід при проведенні гірничої виробки призводить до зміни їх фільтраційної проникності [5]. Зміну значень коефіцієнтів проникності в залежності від компонент тензора головних напружень можна описати таким чином:

$$k_{\text{tech}} = f(\sigma_{ij}), \quad (2)$$

де k_{tech} – коефіцієнт проникності, яка обумовлена проведенням виробки, мДа; $f(\sigma_{ij})$ – функція, яку визначено в роботі [5].

Процес фільтрації води в порушених породах описується наступним рівнянням:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K}{\mu \cdot \beta \cdot m_p} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t), \quad (3)$$

де p – тиск води, МПа; K – коефіцієнт проникності, мДа; μ – в'язкість води, Па·с; β – коефіцієнт стисливості води, 1/Па; $q(t)$ – функція припливу (стоку) води.

По обидва боки від порушення породи перем'яті і мають початкову тектонічну проникність. Деякі породні шари також мають природну проникність. Технологічна проникність k_{tech} , яка виникає при проведенні виробки і залежить від компонент тензора напружень, накладається на поле тектонічної k_{tect} і природної k_{nat} проникності:

$$K = k_{\text{tech}} + k_{\text{tect}} + k_{\text{nat}}. \quad (4)$$

Для прикладу розглянемо подовжній перетин капітальної виробки висотою 4 м, яка проводиться в складних умовах, подібних до умов проведення східного магістрального відкотного штреку шахти ім. М.І. Сташкова. У покрівлі виробки розташований обводнений тріщинуватий вугільний прошарок потужністю 0.4 м і обводнений пісковик потужністю 2.2 м; в забої – обводнений пісковик потужністю 0.8 м. Виробка перетинає диз'юнктивне тектонічне порушення «скид» з амплітудою зміщення 1 м.

Центральний фрагмент скінченно-елементної сітки для цієї задачі показаний на рис. 1.

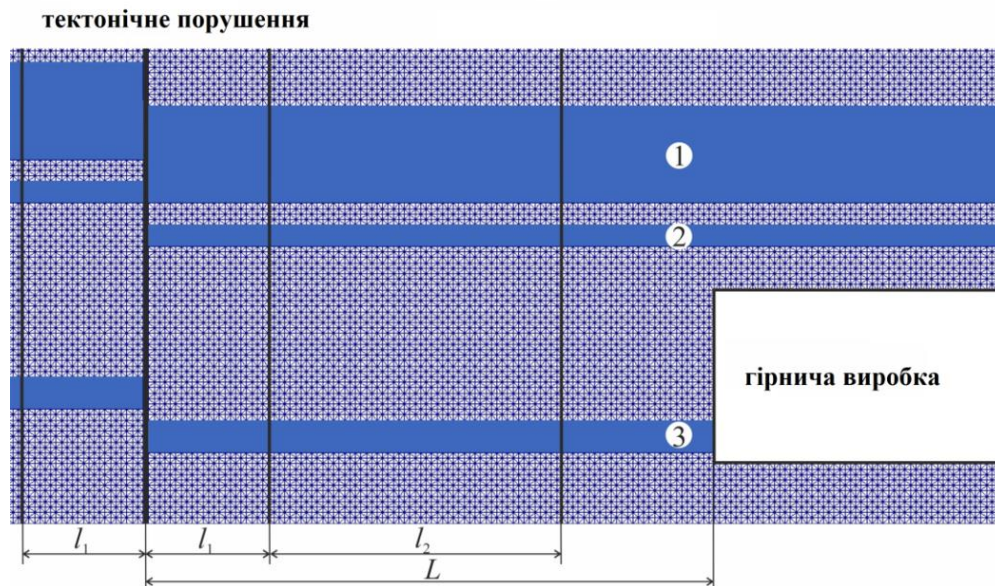


Рисунок 1. Центральний фрагмент скінченно-елементної сітки:
1, 3 – обводнені пісковики; 2 – обводнений тріщинуватий вугільний прошарок

Початкові і граничні умови для поставленої задачі:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \\ u_x|_{\Omega_1} &= 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0; \\ p|_{\Omega_3} &= 0.1 \text{ МПа}; \quad p|_{\Omega_3, t=0} = p_0, \end{aligned} \quad (5)$$

де γ – усереднена вага гірничих порід, що розташовані вище, Н/м^3 ; H – глибина розробки, м; λ – коефіцієнт бічного розпору; Ω_1 – вертикальні межі зовнішнього контуру; Ω_2 – горизонтальні межі зовнішнього контуру; Ω_3 – контур виробки; Ω_4 – область обводнених порід; p_0 – пластовий тиск води, МПа.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Задача (1)–(4) з початковими і граничними умовами (5) розв’язується методом скінченних елементів [6-7] в пружно-пластичній постановці із застосуванням умови міцності Кулона-Мора. Для аналізу напруженого стану породного масиву використовується параметр $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H$, що характеризує різнокомпонентність поля напружень.

Будемо вважати, що початкова проникність пісковика – 0.002 мДа; початкова проникність вугільного прошарку – 0.005 мДа; проникність в зоні $l_1 = 3$ м від площини зсуву – 0.5 мДа; в зоні $l_2 = 7$ м – 0.1 мДа; $p_0 = 3.5$ МПа.

Розглянемо випадки, коли капітальна виробка закріплена рамним кріпленням і її забій знаходиться на різній відстані L (рис. 1) від тектонічного порушення:

- а) $L = 12$ м, $L > l_1 + l_2$, виробка за межами впливу тектонічного порушення;

- б) $L = 7$ м, $l_1 < L < l_1 + l_2$, виробка в слабо порушеній зоні;
- в) $L = 1$ м, $L < l_1$, виробка в максимально порушеній зоні тектонічного порушення.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

З використанням наведених вище співвідношень були отримані поля напружень і зони непружних деформацій на різних часових ітераціях, рис. 2.

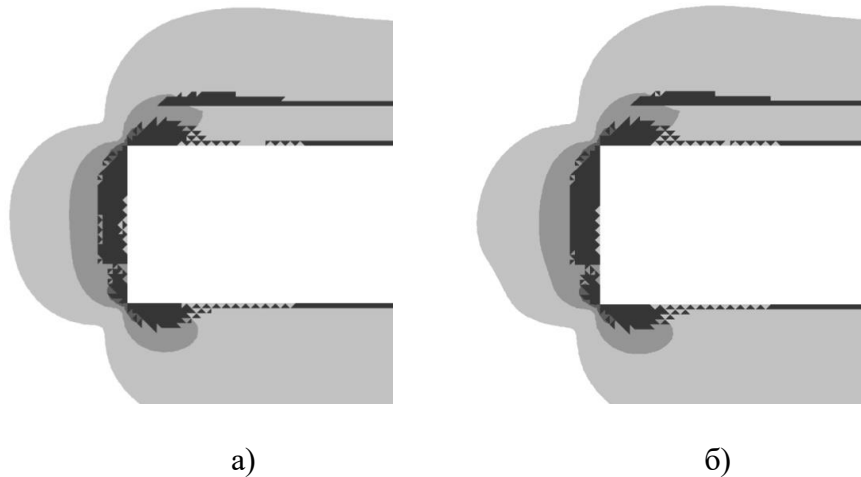


Рисунок 2. Різномісність поля напружень і зони непружних деформацій: відстань до тектонічного порушення а) 1 м; б) 12 м

З рисунка видно, що навколо виробки сформована область підвищеної різномісності поля напружень. Контур виробки оточує зона непружних деформацій, що призводить до збільшення тріщинуватості вміщуючих порід, їх розшарування і руйнування.

Далі в результаті розрахунку одержуємо значення коефіцієнтів проникності в кожній точці досліджуваної області, рис. 3



Рисунок 3. Розподіл значень коефіцієнтів проникності породного масиву: відстань до тектонічного порушення а) 6 м; б) 12 м

На рисунках видно темніші зони тектонічної проникності і світліші зони природної проникності обводненого пісковика і вугільного прошарку.

Видно, що в покрівлі виробки сформована область фільтрації глибиною до 2.4 м, в яку повністю потрапляє водоносний вугільний прошарок і частково – пісковик. У середині цієї області вода може переміщатися до контуру виробки. При наближенні до диз'юнктивного порушення, рис. 3б, забій виробки переміщається в зону порушених порід, які легко розшаровуються і руйнуються при підробці. Підпірне кріплення не в змозі стримати цей процес, відбувається значне зростання фільтраційної проникності в цій зоні.

Розподіли значень тиску води показані на рис. 4. Можна бачити, що тиск води в обводнених пластах поблизу скиду помітно понижений в порівнянні з пластовим тиском, рис. 4б і 4в. Як показує практичний досвід, підвищена проникність порід в зонах тектонічних порушень обумовлює рух глибинних напірних вод уздовж площини зсуву в вертикальному напрямку [8].

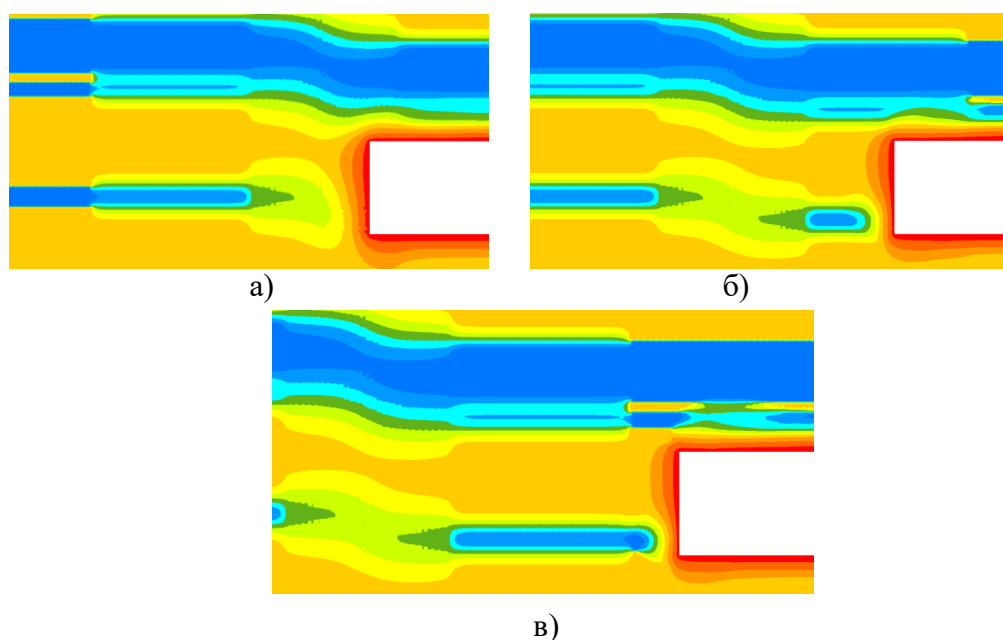


Рисунок 4. Розподіл значень тиску води: відстань до тектонічного порушення а) 1 м; б) 6 м; в) 12 м

У покрівлі виробки активно відбувається процес фільтрації води і за межами порушеної зони і поблизу тектонічного порушення. Тиск води в підробленому обводненому вугільному прошарку і частині пісковика знижується (рис. 4), вода переміщується з областей з більш високим тиском туди, де тиск мінімальний – в виробку. Коли вибій виробки наближається до порушення і входить в порушену зону, інтенсивність фільтраційного процесу підвищується, рис. 4б, 4в.

На графіку рис. 5 видно, що при великій відстані гірничої виробки до тектонічного порушення швидкість фільтрації мінімальна. І навпаки, при наближенні виробки до порушення вона зростає.

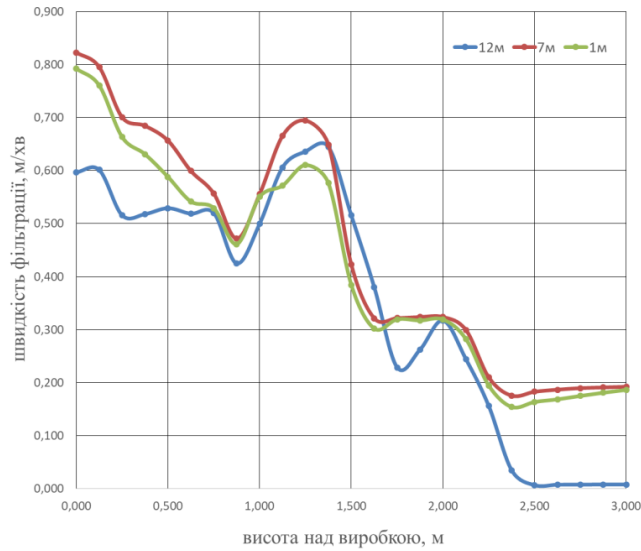


Рисунок 5. Графік зміни швидкості фільтрації в залежності від відстані до тектонічного порушення

В результаті розрахунку отримано значення водопритливу, рис. 6: сумарний водопритлив, водопритлив з пісковика у вибої виробки, водопритлив з 1 п.м покрівлі. У всіх трьох випадках водопритлив зростає при наближенні виробки до тектонічного порушення. Водопритлив з 1 п.м покрівлі збільшується до двох разів. Ділянку в радіусі 7 м можна виділити як найбільш активну зону впливу тектонічного порушення.

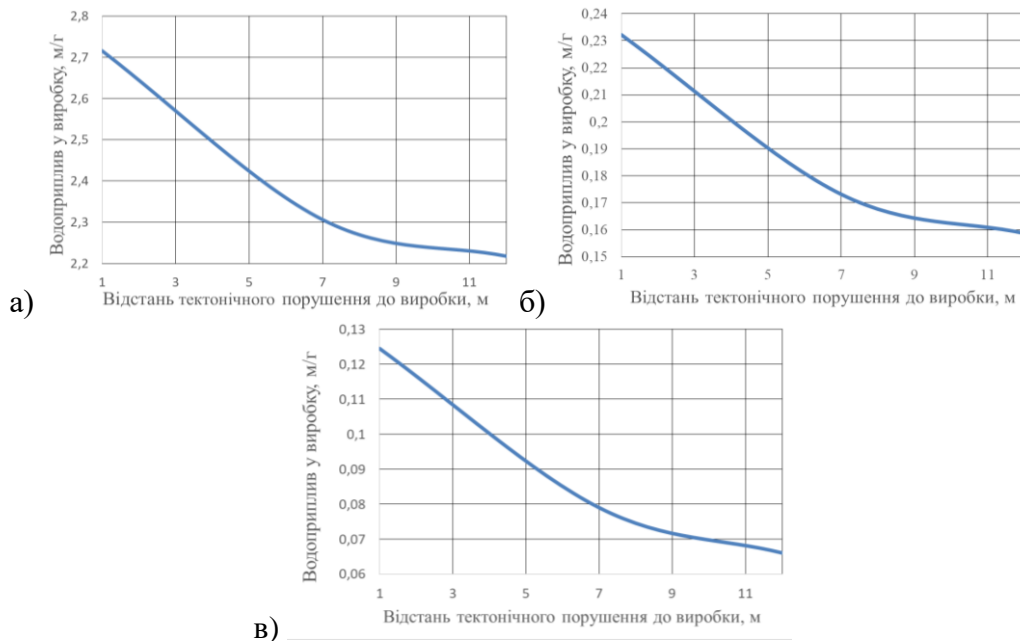


Рисунок 6. Зміна величини водопритливу в виробку при наближенні до порушення: а) сумарний водопритлив; б) водопритлив з пісковика в забій виробки; в) водопритлив з 1 п.м покрівлі

5. ВИСНОВКИ

Розглянуто проблему водопрпливу в українських вугільних шахтах, які відрізняються складними гідрогеологічними умовами. Виконано чисельне дослідження зміни водопрпливу в гірничу виробку при перетині нею тектонічного порушення.

В результаті розв'язання задачі отримані значення напружень, зони непружних деформацій, значення коефіцієнтів проникності, тиску води і водопрпливів на різних відстанях від геологічного порушення до виробки. Показано та проаналізовано вплив тектонічного порушення на зміну фільтраційних і геомеханічних параметрів навколо виробки. При наближенні виробки до порушення активізуються процеси деформування, руйнування приконтурних порід, які з часом захоплюють близько розташовані водоносні шари, з яких починається перетікання води у виробку.

Аналіз отриманих даних показав, що в покрівлі виробки з рамним кріпленням утворюється область фільтрації, яка охоплює водоносні породи. У середині цієї області вода може переміщатися до контуру виробки. При наближенні до тектонічного порушення відбувається значне зростання фільтраційної проникності. Дебіт води в виробку досягає критичних значень. Водопрплив з 1 п.м покрівлі збільшується до двох разів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.О. Соцков, А.М. Загриценко, Н.І. Деревягіна. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, 6, 2 (2019)
2. H. Masoumi, J. Horne, W. Timms. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 50, 8 (2017).
3. H. Liu, W. Zhu, Y. Yu, T. Xu, R. Li, X. Liu. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 127 (2020)
4. V. Krukovska, Y. Vynohradov. Water stability influence of host rocks on the process of water filtration into mine working with frame and roof-bolting support. *Essays of Mining Science and Practice 2019. E3S Web of Conferences*, 109, 00041.
5. V.V. Krukovska, O.P. Krukovskiy, Yu.O. Vinogradov. Study water inflow in mines with anchors, *Geotechnical Mechanics*, 120 (2015).
6. Аликин, В.Н., Литвин, И.Е., Щербаков, С.М., & Бородавкин, В.П. (1992). *Метод конечных элементов в задачах газонефтепромышленной механики*. М.: Недра.
7. Zienkiewicz, O.C. (2000). *The finite element method*. Butterworth-Heine-mann, T.1, 690 p.
8. Nie, W., Zhao, Z.Y., Ma, S.Q., Guo, W., 2018. Effects of joints on the reinforced rock units of fully-grouted rockbolts. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 71, 15–26

REFERENCES

1. V.O. Sotskov, A.M. Zagritsenko, N.I. Derevyagina. Introductory notes from TNU imeni V.I. Vernadsky. Series: technical sciences, 6, 2. (2019)
2. H. Masoumi, J. Horne, W. Timms. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 50, 8 (2017).
3. H. Liu, W. Zhu, Y. Yu, T. Xu, R. Li, X. Liu. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 127 (2020)

4. V. Krukovska, Y. Vynohradov. Water stability influence of host rocks on the process of water filtration into mine working with frame and roof-bolting support. *Essays of Mining Science and Practice 2019. E3S Web of Conferences*, 109, 00041.
5. V.V. Krukovska, O.P. Krukovskyi, Yu.O. Vinogradov. Study water inflow in mines with anchors, *Geotechnical Mechanics*, 120 (2015)
6. Alikin, V.N., Litvin, I.E., Scherbakov, S.M., Borodavkin, V.P. (1992). *The finite element method in the problems of gas-petroleum field mechanics*. Moskva: Nedra.
7. Zienkiewicz, O.C. (2000). *The finite element method*. Butterworth-Heine-mann, T. 1, 690 p.
8. Nie, W., Zhao, Z.Y., Ma, S.Q., Guo, W., 2018. Effects of joints on the reinforced rock units of fully-grouted rockbolts. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 71, 15–26

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Метою роботи є дослідження водопрпливу в гірничу виробку, що проводиться в складних гідрогеологічних умовах переходу тектонічного порушення.

Методика. При вирішенні задачі про фільтрацію води в деформованому масиві використовувався розроблений автором раніше метод вивчення стану шаруватого породного масиву з гірничою виробкою при наявності в її околі обводнених шарів, а також метод скінченних елементів.

Результати. У даній роботі виконано чисельне дослідження зміни водопрпливу в гірничу виробку, яка проводиться в складних гідрогеологічних умовах, при перетині тектонічного порушення. Виконано розрахунок поля напружень, зон непружних деформацій, коефіцієнтів проникності, яка залежить від напруженого стану і враховує тектонічну і природну проникність порід. Також наведені результати розрахунку тиску води і водопрпливу в виробку у всіх розглянутих випадках. Аналіз отриманих даних показав, що в покрівлі виробки з рамним кріпленням утворюється порушена зона, яка охоплює водоносні породи. У середині цієї області вода може вільно переміщатися до контуру виробки. При наближенні до диз'юнктивного порушення відбувається значне зростання фільтраційної проникності. Дебіт води в виробку досягає критичних значень.

Наукова новизна. Вперше виконано моделювання водопрпливів в гірничу виробку в зоні впливу тектонічного порушення. Показано, що при наближенні виробки до порушення активізуються процеси деформування, руйнування приконтурних порід, які з часом захоплюють близько розташовані водоносні шари, з яких починається перетікання води у виробку, і рамне кріплення не здатне стримати ці процеси.

Практична значимість. Розроблена математична модель зв'язаних процесів деформування гірничих порід з водоносними шарами і фільтрації води може використовуватися для дослідження водопрпливу в різних гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: водопрплив в виробку, проникність порід, фільтрація води, чисельне моделювання.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Целью работы является исследование изменения водопритока в горную выработку, проводимую в сложных гидрогеологических условиях перехода тектонического нарушения.

Методика. При решении задачи о фильтрации воды в деформируемом массиве использовался разработанный автором ранее способ исследования состояния слоистого породного массива с горной выработкой при наличии в ее окрестности обводненных слоев.

Результаты. В данной работе выполнено численное исследование изменения водопритока в горную выработку, которая проводится в сложных гидрогеологических условиях, при пересечении тектонического нарушения. Выполнен расчет поля напряжений, зон неупругих деформаций, коэффициентов проницаемости, которая зависит от напряженного состояния и учитывает тектоническую и природную проницаемость пород. Также приведены результаты расчета давления воды и водопритока в выработку во всех рассмотренных случаях. Анализ полученных данных показал, что в кровле выработки с рамной крепью образуется нарушенная зона, которая охватывает водоносные породы. Внутри этой области вода может свободно перемещаться к контуру выработки. При приближении к дизъюнктивному нарушению происходит значительное возрастание фильтрационной проницаемости. Дебит воды в выработку достигает критических значений.

Научная новизна. Впервые выполнено моделирование водопритоков в горную выработку в зоне влияния тектонического нарушения. Показано, что при приближении выработки к нарушению активизируются процессы деформирования, разрушения приконтурных пород, которые со временем захватывают близлежащие водоносные слои, из которых начинается переток воды в выработку, и рамная крепь не способна сдерживать эти процессы.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель связанных процессов деформирования горных пород с водоносными слоями и фильтрации воды может использоваться для исследования водопритока в различных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: водоприток в выработку, проницаемость пород, фильтрация воды, численное моделирование

ABOUT AUTHORS

Vynohradov Yurii, Candidate of Technical Science, Junior Researcher, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: my_pochta_1r@ukr.net