

УДК622.841:622.833.5:622.281.74

<https://doi.org/10.37101/ftpgp24.01.003>

## СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ ВОДОПРИПЛИВУ У ГІРНИЧУ ВИРОБКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМБІНОВАНОГО РАМНО-АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ

О.П. Круковський<sup>1</sup>, Ю.О. Виноградов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

\*Відповідальний автор: e-mail: my\_pochta\_1r@ukr.net

## THE METHOD OF REDUCING WATER INFLOWS INTO MINE WORKINGS WITH USING OF COMBINED FRAME-ROOF BOLTING

O.P. Krukovskiy<sup>1</sup>, Y.O. Vynogradov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: my\_pochta\_1r@ukr.net

### ABSTRACT

**Purpose.** Improvement of the method of reducing water inflows into mine workings with using of combined frame-roof bolting to ensure the stability of the mine workings, waterproofing and protection against the collapse of wet contour rocks inside the mine workings.

**Methods.** When solving the problem of water filtration in deformed rock, the method of studying the state of a layered rock massif with a mine working in the presence of water-saturated layers in its vicinity, which was developed by the authors, as well as the finite element method were used.

**Findings.** With the help of numerical methods, stress fields and water inflows were calculated, on the basis of which the method of reducing water inflows into mine workings with using of combined frame-roof bolting was developed. The use of frame-roof bolting is substantiated both in favourable conditions, in poorly watered host rocks in mine workings with small water inflows, and in conditions of strongly watered rocks, in mine workings with water inflows of more than 10 m<sup>3</sup>/h. Therefore, frame-roof bolting can be considered as the second line of defense, which should be used in the presence of water-bearing rocks.

**Originality.** For the first time, a method of reducing water inflows into mine workings with using of combined frame-roof bolting, namely steel frames and nets together with steel-polymer rock bolts, was developed to ensure the stability of

mine workings, waterproofing and protection against the collapse of wet contour rocks inside mine workings.

**Practical implications.** Application of the proposed method will make it possible to obtain a significant economic effect due to the reduction of costs for water pumping and repair work to restore mine workings after emergency water inflows and when changing the frame to the roof bolting.

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

## 1. ВСТУП

Відомо, що проведення та підтримка гірничих виробок вугільних шахт в Україні здійснюється у складних гірничо-геологічних умовах з наявністю великої кількості обводнених порід. В таких умовах приконтурні породи розмокають і втрачають властивості міцності, що значно ускладнює проведення та експлуатацію гірничих виробок, знижує їх стійкість [1, 2, 3]. Велика кількість ускладнень та аварій в гірничих виробках пов'язана з водопримивами при підробці водоносних порід [4]. Наявність води у виробці ускладнює виконання всіх робіт по її проведенню, знижує швидкість гірничопробних робіт і робить їх дорожчими.

На сьогоднішній день в світі розроблені різні методи боротьби з водопримивами в гірничих виробках: створення протифільтраційних завіс, дренажних повстаючих свердловин, контурний дренаж пластовими штреками; спеціальні методи проходки шахтних стволів; метод забивного і опускного кріплення; метод кесонної проходки; метод хімічного закріплення порід; метод тампонування; метод штучного заморожування; метод шахтобуріння; метод попереднього (випереджуючого) зниження рівня підземних вод дренажними свердловинами [5]. Але не всі вони підходять для умов даного регіону, або застосовуються не так часто. Інші методи недостатньо ефективні, чи вимагають великих фінансових витрат, та не враховують зміни напружено деформованого стану гірських порід навколо виробки та його впливу на фільтраційну проникність масиву.

Тому метою роботи є удосконалення способу зниження водопримиву у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення для забезпечення стійкості гірничої виробки, гідроізоляції і захисту від обвалення розмокших приконтурних порід всередину виробки.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Традиційне для українських шахт рамне кріплення не забезпечує відчутних результатів. Воно не взаємодіє з масивом і ніяк не перешкоджає його руйнуванню, лише підтримує покрівлю [6]. У той час як анкерне кріплення не тільки тримає породу, але зшиває масив – подібно до арматури в бетонних будівельних конструкціях.

Рамно-анкерне кріплення – це комбінована технологія кріплення, коли склепіння виробки стягують анкерами, а також підпирають потужною металевою рамою [7]. Анкери закріплюються в шпурі за допомогою полімерного

закріплювача. Таким чином, анкери формують несну конструкцію, яка надійно утримує породний масив. Укріплені анкером породи в покрівлі та боках виробки не деформуються, не руйнуються і не обсипаються. Сьогодні це найпрогресивніший спосіб кріплення, що забезпечує високу стійкість виробок і максимальну безпеку для шахтарів [8, 9].

Розглянемо сталу фазу фільтрації води в виробку при підробці обводнених порід. Для опису процесу фільтрації води з урахуванням залежності фільтраційної проникності від напруженого стану гірських порід необхідно рішення пов'язаної системи рівнянь пружно-пластичного деформування і фільтрації [10].

Напружено-деформований стан породного масиву в околі гірничої виробки описується системою рівнянь:

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

де  $\sigma_{ij,j}$  – похідні від компонент тензора напружень по  $x, y$ , МПа/м;  $X_i(t)$  – проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму твердого тіла, Н/м<sup>3</sup>.

Граничні умови:

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

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

де  $u_i$  – переміщення, м;  $\Omega_1$  – вертикальні межі зовнішнього контуру;  $\Omega_2$  – горизонтальні межі зовнішнього контуру.

Задача розв'язується в пружно-пластичній постановці. Для математичного опису процесу переходу гірських порід в порушене становище застосовується умова міцності Кулона-Мора, яка враховує можливість виникнення руйнування в результаті і зсуву, і відриву.

Фільтраційна проникність середовища є найважливішою характеристикою, що визначає значення параметрів процесу фільтрації. Проникність твердих тіл залежить від напружено-деформованого стану, в якому вони знаходяться [11, 12].

Для розрахунку параметрів фільтрації рідини приймаються такі припущення: фільтраційний потік вважається ізотермічним, безперервним.

Рівняння нерозривності фільтраційного потоку при наявності джерела можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + q(t) = 0,$$

де  $p$  – тиск води, МПа;  $k$  – проникність порід, мДа.

Граничні умови:

$$p|_{\Omega_1} = p_1;$$

$$p|_{\Omega_2} = p_2,$$

де  $\Omega_1$  – контур виробки;  $\Omega_2$  – водонасичені шари гірських порід;  $p_1$  – тиск води на контурі виробки дорівнює атмосферному,  $p_1=0,1$  МПа;  $p_2$  – тиск води в водонасичених породах, МПа.

Для дослідження було розглянуто виробку аркового типу висотою 4 м, яка проводиться на глибині 400 м, в різних гідрогеологічних умовах, і яку закріплено за різними схемами рамно-анкерного кріплення:

- 1) проста з 8 анкерами, розташованими в площині перерізу виробки;
- 2) посилена з 13 анкерами, з яких 8 розташовано в площині перерізу виробки та 5 – з нахилом на вибій виробки;
- 3) потужна з 13 анкерами, з яких 6 розташовано в площині перерізу виробки, 5 – з нахилом на вибій виробки та 2 – з нахилом на устя виробки.

### 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для обґрунтування параметрів способу зниження водоприпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення використовувався метод скінченних елементів [13-14], який є одним з найбільш поширених чисельних методів. Він дозволяє враховувати форму поперечного перерізу гірничих виробок, складні граничні умови і різноманітні властивості гірських порід. Суть даного методу полягає в мінімізації повної потенційної енергії, вираженої через кінцеве число вузлових параметрів, що призводить до заміни системи диференціальних рівнянь системою звичайних алгебраїчних рівнянь.

При використанні чисельних методів суцільне середовище апроксимується дискретним. Причому при посиленні дискретизації – збільшенні кількості скінченних елементів, що становлять досліджувану область, і зменшенні їх розмірів – поведінка дискретної моделі наближається до поведінки «безперервної системи» – суцільного середовища [15].

### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В результаті аналізу отриманих даних щодо напружень і водоприпливів було розроблено спосіб зниження водоприпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення.

Спосіб полягає у послідовному виконанні наступних операцій.

1. Установка рамного кріплення одразу після виїмки породи в вибої виробки.
2. Закріплення сітки-затягування між новим і попереднім рядами рамного кріплення.

3. Через чарунки сітки виконують буріння шпурів.

4. В шпури установлюють сталеві анкери з полімерним закріпленням:

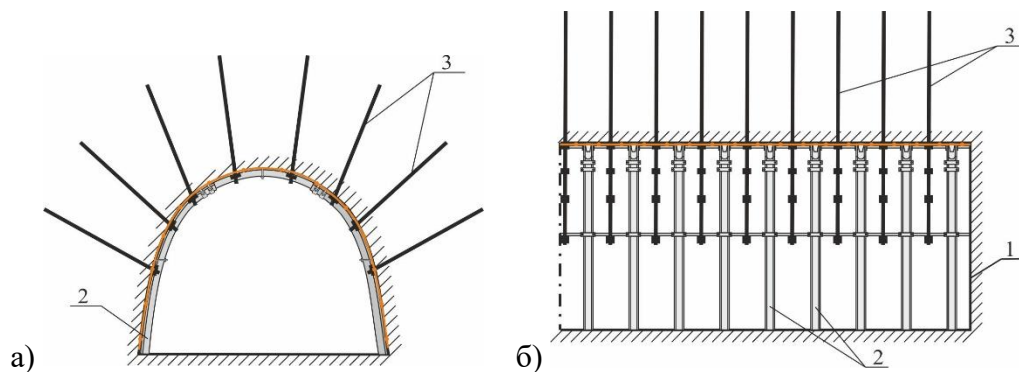
- за умов слабо обводнених вмштуючих порід (водоприплив у виробку до  $5 \text{ м}^3/\text{год}$ ) анкери установлюють в площині перетину виробки перпендикулярно поздовжній осі, за простою схемою;

- за умов середньо обводнених порід (водоприплив у виробку  $5-10 \text{ м}^3/\text{год}$ ) частину анкерів установлюють з нахилом на вибій виробки, за посиленою схемою;

- за умов сильно обводнених порід (водоприплив у виробку більше  $10 \text{ м}^3/\text{год}$ ) частину анкерів установлюють з нахилом на вибій виробки, частину – в протилежний напрям, за потужною схемою.

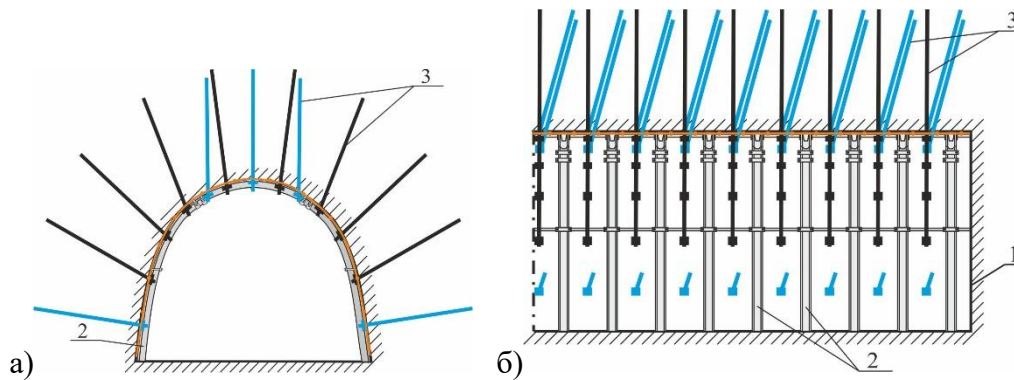
Затягування металевою сіткою поверхні оголених порід дозволяє одразу після посування вибою виробки попередити обвалення нестійких водонасичених приконтурних порід і забезпечити безпеку праці шахтарів та цілість обладнання. При цьому сітка затримує невеликі шматки порід, рамне кріплення – більш об'ємні і важкі. Потім за рахунок просторового розташування сталеві-полімерних анкерів формують породно-анкерну конструкцію, що запобігає подальшому деформуванню гірських порід. В результаті фільтраційна проникність навколо виробки не збільшується з часом, що дозволяє зменшити водоприплив у виробку.

Приклад простої схеми установки анкерів в сприятливих умовах слабо обводнених вмштуючих порід, у виробках з невеликим водоприпливом до  $5 \text{ м}^3/\text{год}$  наведено на рис. 1.



**Рисунок 1. Приклад простої схеми анкерного кріплення: 1 – вибій; 2 – рами; 3 – анкери;  
а) поперечний та б) поздовжній переріз**

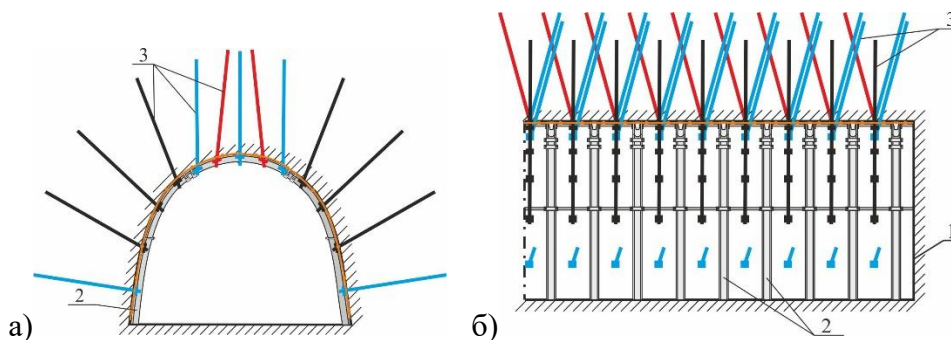
Приклад посиленої схеми установки анкерів в більш складних умовах, у виробках із водоприпливом до  $5-10 \text{ м}^3/\text{год}$  наведено на рис. 2.



**Рисунок 2. Приклад посиленої схеми анкерного кріплення: 1 – вибій; 2 – рами; 3 – анкери;  
а) поперечний та б) повздожній переріз**

Посилена анкерно-породна конструкція передбачає установку частини анкерів з нахилом на вибій виробки, що значно посилює взаємодію між рядами анкерів, поліпшує стан покрівлі і боків виробки і протидіє початку розвитку непружних деформацій, що забезпечує більш високий рівень монолітності оточуючих порід.

Приклад потужної схеми установки анкерів за умов сильно обводнених порід, у виробках із водоприпливом більше  $10 \text{ м}^3/\text{год}$  наведено на рис. 3. Потужна схема установки анкерів сприяє більш жорсткому обмеженню зміщень порід у виробку, зберігаючи їх природну монолітність, та забезпечує необхідний рівень проникності порід навколо виробки на період її експлуатації.



**Рисунок 3. Приклад потужної схеми анкерного кріплення: 1 – вибій; 2 – рами; 3 – анкери;  
а) поперечний та б) повздожній переріз**

## 5. ВИСНОВКИ

Розроблено спосіб зниження водоприпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення. Було обґрунтовано застосування анкерно-породних конструкцій як в сприятливих умовах, слабо обводнених вмштуючих порід, у виробках з невеликим водо припливом, так й за умов сильно обводнених порід, у виробках із водоприпливом більше  $10 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Використання анкерного кріплення дозволяє зберегти гірничу виробку в стійкому стані, знизити проникність вміщуючих порід, значно зменшити водопритливи і забезпечити надійне, безпечне функціонування гірничих виробок протягом усього терміну їх експлуатації. Тому анкерне кріплення можна розглядати як другу лінію захисту, яка повинна застосовуватися за наявності водоносних порід.

Установка рамного кріплення одразу після виїмки породи в вибої виробки і затягування металевою сіткою поверхні оголених порід дозволяє одразу після посування вибою виробки попередити обвалення нестійких водонасичених приконтурних порід і забезпечує безпеку праці шахтарів та цілість обладнання. При цьому сітка затримує невеликі шматки порід, рамне кріплення – більш об'ємні і важкі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shakoор A., Barefield E.H. (2009). Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience*, 15(1), 29-40.
2. Eunhye K., Michael A.S., Davi B.M., Hosse-in C. (2017). Correlations between the physical and mechanical properties of sandstones with changes of water content and loading rates. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (100), 255-262.
3. Krukovskiy O, Krukovska V and Skipochka S 2021 Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts Mining of Mineral Deposits, 15(4), 8-14.
4. Yuedu Chen, Selvadurai A.P.S., Weiguo Liang. (2019). Computational Modelling of Groundwater Inflow During a Longwall Coal Mining Advance: A Case Study from the Shanxi Province, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (52), 917-934.
5. Круковський О.П., Виноградов Ю.О. (2016). Розробка способу зниження водопритливу у гірничу виробку із застосуванням анкерного кріплення. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва: Сборник научных трудов*, (18), 83-90.
6. Виноградов Ю.О. (2021). Зміна параметрів фільтрації води навколо гірничих виробок в зоні впливу тектонічного порушення. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва: Сборник научных трудов*, (23), 108-117.
7. Булат А.Ф., Виноградов В.В. (2002). Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 372 с.
8. Круковский А.П. (2020). Формирование элементов конструкции анкерной крепи горных выработок. *Геотехническая механика*, (151), 27-62.
9. Krukovskiy O., Bulich Y., Zemlianaia Y. (2019). Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity. *E3S Web of Conferences, Essays of Mining Science and Practice*, (109), 00042.
10. Круковський О.П., Круковська В.В., Виноградов Ю.О. (2022). Застосування технології анкерного кріплення гірничих виробок в газоносних та обводнених породах. *Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал*, 1(50), 56-67.
11. V. Krukovska, Y. Vynogradov. (2019). 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. E3S Web of Conferences*, (109), 00041.
12. V.V. Krukovska, O.P. Krukovskiy, Yu.O. Vinogradov. (2015). Study water inflow in mines with anchors. *Geotechnical Mechanics*, (120).
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R. L., Zhu J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 756 p.

14. de Borst R., Crisfield M.A., Remmers J.J.C., Verhoosel C.V. (2012). Non-linear finite element analysis of solids and structures, John Wiley & Sons, 544 p.
15. Hestenes, M.R. (1952). Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems / M.R. Hestenes, E. Stiefel // J. Res. Natl. Bur. Stand. (Vol. 49), 409-436.

### **REFERENCES**

1. Shakoor A., Barefield E.H. (2009). Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience*, 15(1), 29-40.
2. Eunhye K., Michael A.S., Davi B.M., Hosse-in C. (2017). Correlations between the physical and mechanical properties of sandstones with changes of water content and loading rates. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (100), 255-262.
3. Krukovskiy O, Krukovska V and Skipochnka S. (2021). Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts Mining of Mineral Deposits. 15(4), 8-14.
4. Yuedu Chen, Selvadurai A.P.S., Weiguo Liang. (2019). Computational Modelling of Groundwater Inflow During a Longwall Coal Mining Advance: A Case Study from the Shanxi Province, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (52), 917-934.
5. Krukovskiy O.P., Vynogradov Y.O. (2016). Rozrobka sposobu znyzhennia vodopryplyvu u hirnychu vyrobku iz zastosuvanniam ankernoho kriplennia. *Fyzyko-tekhnycheskye problemyhornooho proyzvodstva*, (18), 83-90.
6. Vynogradov Y. (2021). Zmina parametriv filtratsii vody navkolo hirnychykh vyrobok v zoni vplyvu tektonichnoho porushennia. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornooho proyzvodstva*, ( 23), 108-117.
7. Bulat A.F., Vinogradov V.V. (2002). Roof bolting support of mine workings of coal mines, Dnepropetrovsk, Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine, p.372.
8. Krukovskiy O.P. (2020). Formyrovanye elementov konstruksyy ankernoi krey pyhornykh vyrabotok. *Heotekhnycheskaia mekhanyka*, (151), 27-62.
9. Krukovskiy O., Bulich Y., Zemlianaia Y. (2019). Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity. *E3S Web of Conferences, Essays of Mining Science and Practice*, (109), 00042.
10. Krukovska V.V., Krukovskiy O.P., Vynogradov Y.O. (2022). Zastosuvannia tekhnolohii ankernoho kriplennia hirnychykh vyrobok v hazonosnykh ta obvodnennykh porodakh. *Visti Donetskooho hirnychooho instytutu: Vseukrainskyi naukovo-tekhnychnyi zhurnal*. 1(50), 56-67.
11. Krukovska V., Vynogradov Y. (2019). 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 E3S Web of Conferences*, (109), 00041.
12. Krukovska V.V., Krukovskiy O.P., Vinogradov Yu.O. (2015). Study water inflow in mines with anchors, *Geotechnical Mechanics*, 120.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R. L., Zhu J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 756 p.
14. de Borst R., Crisfield M.A., Remmers J.J.C., Verhoosel C.V. (2012). Non-linear finite element analysis of solids and structures, John Wiley & Sons, 544 p.
15. Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems / M.R. Hestenes, E. Stiefel // J. Res. Natl. Bur. Stand. (Vol. 49), 409-436.



## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Удосконалення способу зниження водопрпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення для забезпечення стійкості гірничої виробки, гідроізоляції і захисту від обвалення розмоклих приконтурних порід всередину виробки.

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

**Результати.** За допомогою чисельних методів розраховано та отримано данні щодо напружень і водопрпливів, на підставі яких було розроблено спосіб зниження водопрпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення. Обґрунтовано застосування рамно-анкерного кріплення як в сприятливих умовах, слабо обводнених вміщуючих порід, у виробках з невеликим водопрпливом, так і за умов сильно обводнених порід, у виробках із водопрпливом більше 10 м<sup>3</sup>/год. Отже рамно-анкерне кріплення можна розглядати як другу лінію захисту, яка повинна застосовуватися за наявності водоносних порід.

**Наукова новизна.** Вперше розроблено спосіб зниження водопрпливу у гірничу виробку із застосуванням комбінованого рамно-анкерного кріплення, а саме, сталевих рам і сіток затягування у доповнення до сталєво-полімерних анкерів, який забезпечує стійкість гірничої виробки, гідроізоляцію і захист від обвалення розмоклих приконтурних порід всередину виробки.

**Практична значимість.** Застосування запропонованого способу дозволить отримати значний економічний ефект за рахунок зниження витрат на відкачування води та ремонтні роботи по відновленню виробки після аварійних водопрпливів та при переході з рамного на анкерне кріплення.

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

## ABOUT AUTHORS

Krukovskyi Olexandr, 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, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: igtm@ukr.net.

Vynohradov Yurii, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher in Department of Control of Rocks State, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: my\_pochta\_1r@ukr.net