

### Розділ 3. Фізика гірничих процесів на великих глибинах

УДК 622.267.5

<https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.007>

#### СТІЙКІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ КАМЕР КОЛЕКТИВНОГО ПОРЯТУНКУ ПРАЦІВНИКІВ ШАХТИ

О.П. Круковський<sup>1</sup>, В.В. Круковська<sup>1</sup>, Ю.О. Виноградов<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук 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](mailto:my_pochta_1r@ukr.net)

#### STABILITY OF STRUCTURAL ELEMENTS OF UNDERGROUND SHELTERS FOR THE COLLECTIVE RESCUE OF MINE WORKERS

O.P. Krukovskyi<sup>1</sup>, V.V. Krukovska<sup>1</sup>, Y.O. Vynohradov<sup>2\*</sup>

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

\*Corresponding author: e-mail: [my\\_pochta\\_1r@ukr.net](mailto:my_pochta_1r@ukr.net)

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of a method of studying the stability of structural elements of an underground shelter for the collective rescue of mine workers.

**Methods.** The problem of time-dependent deformation of a coal-rock mass with a mine, a collective rescue shelter and their supporting elements was solved using the finite element method.

**Findings.** A method of studying the stability of structural elements of an underground shelter of collective rescue has been developed. It consists in creating a computer model of a rock mass with a roadway, a collective rescue shelter and their support; numerical calculation of the stress field and zones of inelastic deformations in rocks and support; analysis of the concrete elements stability according to the maximum stresses and the nature of deformation; analysis of the stability of near-contour rocks, which are also one of the structural elements of underground structures, based on minimum stresses.

For example, a numerical model was created to study the stability of structural elements of the underground shelter for collective rescue and the roadway, supported with rock bolts and frames. The calculation of the stress field in the coal-rock mass and supporting elements was performed. It is shown that under the giv-

en mining and geological conditions, the use of rock bolts allows to preserve the roadway and the rescue shelter in a stable condition; the concrete wall between the shelter and the roadway withstands a high load and does not collapse.

**Originality.** For the first time, it was proposed to analyse the stability of the structural elements of an underground shelter for the collective rescue of mine workers in two steps: analysis of the concrete elements stability according to the maximum stresses and the nature of the deformation; analysis of the near-contour rocks stability according to minimum stresses.

**Practical implications.** The application of the proposed method will allow at the design stage to investigate and increase the stability of structural elements of underground collective rescue shelters, thanks to which the level of safety of mine workers will improve.

**Keywords:** stability analysis, supporting elements, underground shelter, research method, numerical simulation

## 1. ВСТУП

Камери колективного порятунку у вугільних шахтах необхідні для захисту гірників під час аварій, пов'язаних з загазованістю гірничих виробок, пожежами і вибухами метано-повітряної суміші. Вони також необхідні для роботи рятувальників, які проводять розвідку та повинні виводити з аварійної ділянки постраждалих [1-3]. Такі камери мають засоби для захисту органів дихання, першої медичної допомоги, запаси питної води та їжі, засоби гасіння пожежі [4-6].

Найбільш доцільним є розташування камер порятунку в ніші в боці виробки, з бетонною стінкою, яка відокремлює камеру від виробки, і герметичними дверцями [5]. Таке розташування дозволяє безперешкодно транспортувати вантажі у виробці та уникнути руйнуючої дії вибухової хвилі у разі вибуху метано-повітряної суміші. Герметичне з'єднання стінки камери колективного порятунку з породами боків та покрівлі виробки і герметичні дверцята забезпечують її ізоляцію від атмосфери виробки, яка у разі аварії може бути отруйною.

Але гірничі виробки проводяться на різних глибинах, в різних гірничо-геологічних умовах [7, 8]. На глибинах, де гірський тиск сягає великих значень, бетонна стінка, що відокремлює камеру колективного порятунку від виробки, може не витримати навантажень і зруйнуватися, породи покрівлі можуть обвалитися всередину камери. Стійкість і герметичність камери колективного порятунку також можуть бути порушені, якщо вона споруджена в слабких породах, які мають низьку межу міцності. Тому велике значення має дослідження стійкості елементів конструкції камери колективного порятунку, до складу яких входять бетонна стінка, кріплення камери, а також породи її боків і покрівлі, в конкретних гірничо-геологічних умовах з метою вибору надійного кріплення і посилення слабких елементів конструкції камери колективного порятунку.

Тому метою роботи є розробка способу дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку працівників шахти.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для виконання дослідження необхідно розглянути виробку з прилеглою камерою колективного порятунку, їх кріплення, бетонну перегородку та інші елементи конструкції камери колективного порятунку і виконати розрахунок їх напруженого стану і зон непружних деформації, в яких і відбувається руйнування та втрата стійкості.

Чисельне моделювання вуглепородного масиву з гірничими виробками дозволяє адекватно відтворювати процес деформування цих підземних конструкцій на заданій глибині, під дією заданих навантажень, тому для досягнення мети будемо застосовувати чисельні методи. Метод скінченних елементів [9-10] 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 [11]. 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 [12].

Чисельний розрахунок моделі проводимо в стаціонарній постановці, якщо для дослідження потрібен розподіл напружень після стабілізації стану виробки [13]:

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

або в нестационарній постановці, якщо треба дослідити динаміку зміни напруженого стану порід і кріплення у часі [8, 14, 15]:

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

де  $\sigma_{ij,j}$  – похідні від компонент тензору головних напружень по горизонтальній осі  $x$  та вертикальній осі  $y$ ;  $X_i(t)$  – проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму твердого тіла;  $c_g$  – коефіцієнт демпфування;  $u_i$  – переміщення;  $t$  – час.

За критерієм міцності Кулона-Мора [16] визначимо зони непружних деформацій, що свідчать про початок процесу тріщиноутворення та руйнування гірських порід або елементів кріплення. Навантаження здійснюємо шляхом задання початкових напружень, що дорівнюють величині гірського тиску  $\gamma H$  ( $\gamma$  – усереднена вага гірських порід, які розташовані вище;  $H$  – глибина ведення гірничих робіт), в скінченних елементах, які моделюють гірський масив.

### 3. РОЗРОБКА СПОСОБУ

Розроблений спосіб дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку полягає у послідовному виконанні наступних операцій.

1. За допомогою стандартного пресу шляхом випробувань зразків порід (матеріалів) визначають фізико-механічні властивості кожного породного шару, що складає досліджувану область гірського масиву, та елементів кріплення.

2. За допомогою програмних комплексів розробки скінченно-елементних сіток, наприклад Femap або Ansys, створюють комп'ютерну модель гірського масиву з порожнинами, що моделюють простір гірничої виробки і камери колективного порятунку відповідно.

3. До основної сітки додаються стрижневі скінченні елементи, що моделюють анкери [17, 18], і трикутні скінченні елементи, що моделюють кріплення: металеві рами, бетонну стінку, забутовування.

4. Кожному скінченному елементу надаються відповідні властивості, які визначено за допомогою випробувань на пресі.

5. Виконується оптимізація сітки скінченних елементів для моделі породного масиву, який складається з шарів різних порід, з гірничою виробкою, камерою колективного порятунку і кріпленням.

6. Отриману тривимірну скінченно-елементну модель експортують в програмне середовище, що реалізує метод скінченних елементів.

7. Задають умови закріплення моделі, які блокують вертикальні переміщення вузлів сітки на горизонтальних границях моделі та горизонтальні переміщення вузлів на вертикальних границях.

8. Навантаження здійснюють шляхом задання начальних напружень, що дорівнюють величині гірського тиску  $\gamma H$  в скінченних елементах, які моделюють гірський масив.

9. Проводять чисельний розрахунок моделі і визначають розподіл напружень.

10. За критерієм міцності визначають зони непружних деформацій, що свідчить про початок процесу тріщиноутворення та руйнування гірських порід або елементів кріплення.

11. Виконують візуалізацію:

- розподілу значень зведеної максимальної компоненти тензора головних напружень  $\sigma_1/\gamma H$ , що характеризує величину максимальних стискаючих напружень;

- розподілу значень зведеної мінімальної компоненти тензора головних напружень  $\sigma_3/\gamma H$ , що характеризує розвантаження порід від гірського тиску;

- зон непружних деформацій, де межу міцності порід і матеріалів перевищено.

12. Виконують аналіз стійкості бетонних елементів кріплення камери колективного порятунку.

Якщо максимальні напруження в бетонних елементах кріплення камери  $\sigma_1/\gamma H$  приймають з великі значення  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$  і в зонах, де  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$ , спо-

стерігається непружне деформування цих елементів кріплення, необхідно їх посилити, вибравши міцніші матеріали, або збільшити їх товщину.

13. Виконують аналіз стійкості приконтурних порід, які теж є одним з елементів конструкції підземних споруджень.

Якщо мінімальні напруження в приконтурних породах покрівлі і боків виробки і камери порятунку  $\sigma_3/\gamma H < 0,4$  і наближаються до нуля, можлива втрата їх стійкості. У цьому випадку необхідно вибрати потужнішу схему їх кріплення.

14. При зміні схеми або параметрів кріплення розрахунок повторюють згідно з пунктами 3-13.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Для прикладу виконаємо дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку, прилеглої до гірничої виробки аркової форми поперечного перерізу, що проводиться по вугільному пласту на глибині 800 м. Вміщуюча порода – аргіліт з низькою межею міцності. І виробку і камеру закріплено анкерно-рамним кріпленням [19], затяжка боків і покрівлі – залізобетонна, камеру колективного порятунку відокремлює від виробки бетонна перегородка товщиною 200 мм. Підшва камери розташована вище підшви виробки на 700 мм.

На рис. 1 зображено двовимірну скінченно-елементну модель гірського масиву з гірничою виробкою 1 і камерою колективного порятунку 2 у поперечному перерізі. Породні шари (вугілля 4 і аргіліт 5) моделюється за допомогою трикутних скінченних елементів 3 і відрізняються своїми фізико-механічними властивостями (модуль пружності  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$ , зчеплення  $C$ , кут внутрішнього тертя  $\phi$ , міцність на стиск  $\sigma_c$ , міцність на розтяг  $\sigma_p$ ). Металеві рами 7, бетонна стінка 8, забутовування 9 також моделюється трикутними скінченними елементами, анкери 6 – стрижневими.

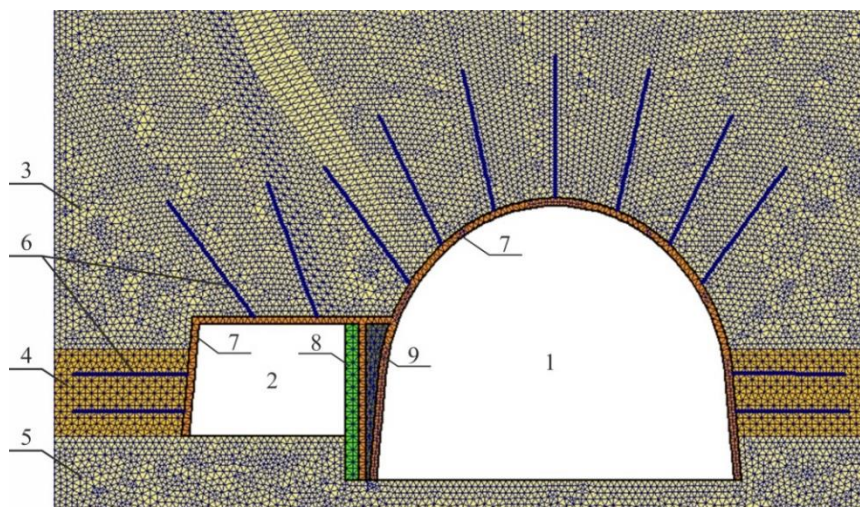
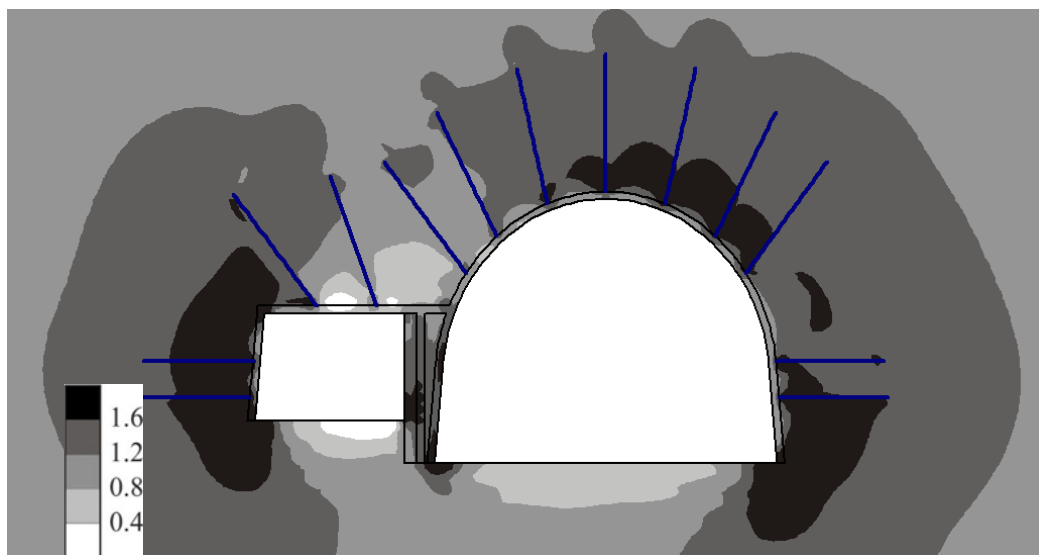


Рисунок 1. Приклад скінченно-елементної моделі гірського масиву з гірничою виробкою, камерою порятунку і елементами їх кріплення

За наведеним алгоритмом було розраховано поле напружень і зони непружних деформацій для скінченно-елементної моделі, яку показано на рис. 1.

**Аналіз стійкості бетонних елементів кріплення камери колективного порятунку.** На рис. 2 наведено розподіл значень максимальної компоненти тензору головних напружень  $\sigma_1/\gamma H$ . Бачимо, що максимальні напруження  $\sigma_1/\gamma H$  набувають найвищих значень в покрівлі виробки, у правому її боці та зліва від підземної камери колективного порятунку. Щодо основного несного елементу перегородки між камерою і гірничою виробкою – бетонної стінки, то в ньому теж присутня велика зона, де  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$ . Вона розташована в нижній частині стінки, на рівні підосви камери колективного порятунку. Її наявність свідчить, що саме ця ділянка бетонної стінки зазнає значних стискаючих напружень. Щоб дізнатися, руйнується вона чи ні, треба проаналізувати зони непружних деформацій, що визначають ймовірні області руйнування (рис. 3).



*Рисунок 2. Результат розрахунку максимальної компоненти тензору головних напружень  $\sigma_1/\gamma H$  в момент часу  $t = 20$  діб*

На збільшених фрагментах (рис. 4) добре видно, що деформування бетонної стінки в зоні, де  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$ , відбувається в пружному режимі, межу міцності бетону не перевищено. Тобто основний елемент перегородки між камерою і гірничою виробкою – міцна бетонна стінка – витримує високе навантаження і не руйнується.

Якщо б максимальні напруження  $\sigma_1/\gamma H$  в бетонних елементах кріплення камери приймали завеликі значення  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$  і в зонах, де  $\sigma_1/\gamma H > 1,6$ , спостерігалось б непружне деформування цих елементів кріплення, необхідно було б їх посилювати, вибравши міцніші матеріали, або збільшити їх товщину.

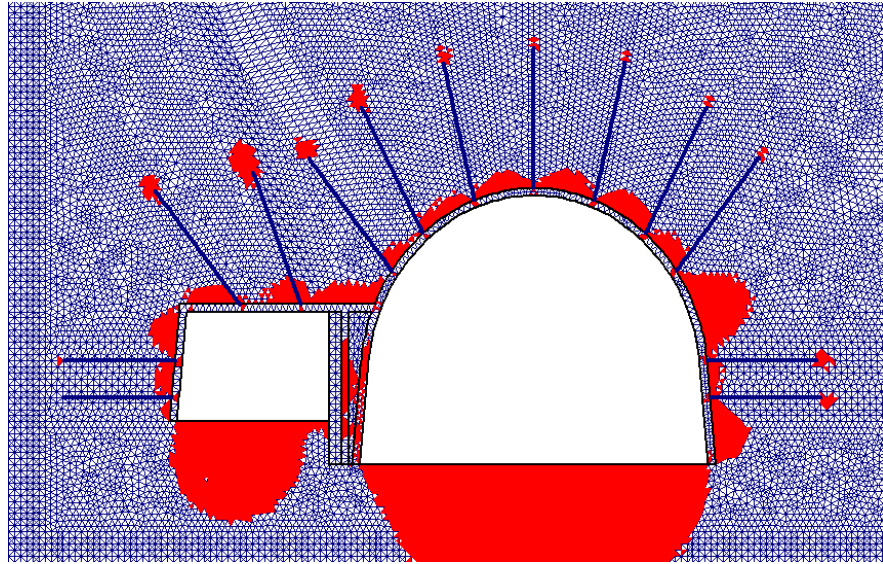


Рисунок 3. Зони непружних деформацій в момент часу  $t = 20$  діб

**Аналіз стійкості приконтурних порід.** На рис. 5 наведено розподіл значень мінімальної компоненти тензора головних напружень  $\sigma_3/\gamma H$ . В непорушеному породному масиві, на віддаленні від виробок, значення  $\sigma_3/\gamma H$  дорівнює одиниці.

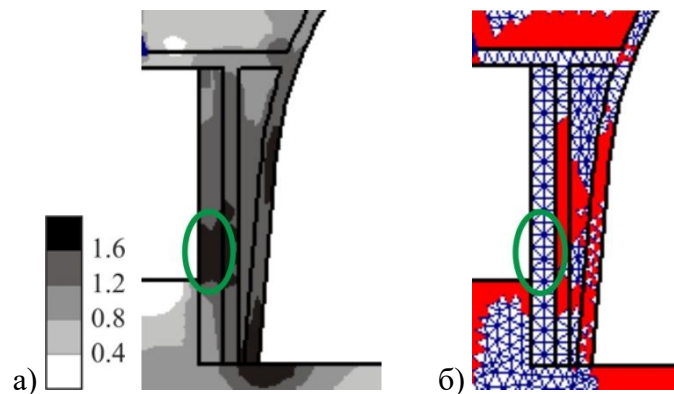
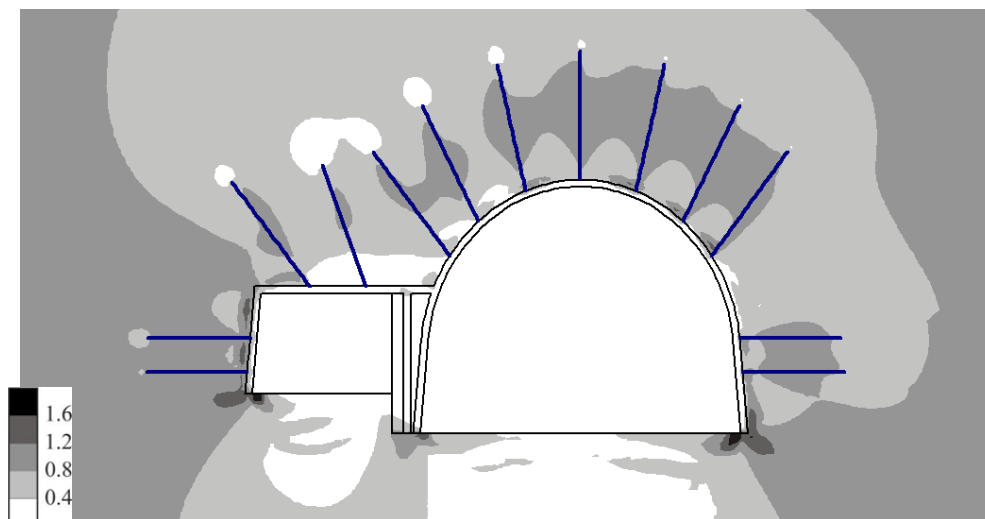


Рисунок 4. Збільшені фрагменти розрахункової області: а)  $\sigma_1/\gamma H$ ; б) зони непружних деформацій

Бачимо, що в переважній частині порід поблизу виробки і камери порятунку  $\sigma_3/\gamma H < 1$ , що говорить про розвантаження приконтурних порід від гірського тиску. А в підшві виробки і камери присутні великі області, де  $\sigma_3/\gamma H < 0,4$ . В даних умовах при замалих значеннях мінімальної компоненти тензора напружень в підшві відбувається руйнування аргіліту, що підтверджується наявністю зон непружних деформацій, рис. 3.



*Рисунок 5. Результат розрахунку мінімальної компоненти тензору головних напружень  $\sigma_3/\gamma H$  в момент часу  $t = 20$  діб*

Але в покрівлі і боках виробки і камери значення  $\sigma_3/\gamma H$  наближуються до одиниці, як в непорушеному масиві, – в заанкерованих зонах породи збережено в природному, монолітному стані. Тобто, вибране анкерно-рамне кріплення забезпечує стійкий стан виробки і камери порятунку в заданих гірничо-геологічних умовах, що є передумовою безпеки ведення гірничих робіт.

Якщо б мінімальні напруження в приконтурних породах покрівлі і боків виробки і камери порятунку  $\sigma_3/\gamma H$  були нижчими за 0,4 і наближалися до нуля, була б можлива втрата стійкості виробки. У цьому випадку необхідно було б вибрати потужнішу схему їх кріплення.

## 5. ВИСНОВКИ

Розглянуто проблему порятунку працівників вугільних шахтах під час аварій, пов'язаних з загазованістю гірничих виробок, пожежами і вибухами метано-повітряної суміші, за допомогою камер колективного порятунку. Стійкість і герметичність таких камер має першочергове значення в умовах наявності шкідливих газів в атмосфері шахтних виробок і при веденні гірничих робіт в газоносному вуглепородному масиві.

Розроблено спосіб дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку, який полягає у створенні комп'ютерної моделі гірського масиву з гірничою виробкою, камерою колективного порятунку і їх кріпленням; чисельному розрахунку поля напружень і зон непружних деформацій в породах і кріпленні; аналізі стійкості бетонних елементів кріплення камери колективного порятунку за максимальними напруженнями і характером деформування; аналізі стійкості приконтурних порід, які теж є одним з елементів конструкції підземних споруджень, за мінімальними напруженнями. Чисельне моделювання вуглепородного масиву з виробкою, камерою колективного порятунку і усіма елементами їх кріплення дозволяє адекватно відтворювати процес деформування цих підземних конс-



трукцій на заданій глибині, під дією заданих навантажень, в певних гірничо-геологічних умовах. Перевагами запропонованого способу є створення моделі, яка ураховує наявність камери колективного порятунку з різними видами кріплення поряд з гірничою виробкою, чисельний розрахунок поля напружень і аналіз стійкості елементів конструкції камери за максимальними і мінімальними компонентами тензору головних напружень і зонами непружних деформацій.

Для прикладу створено чисельну модель для дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку і гірничої виробки, розташованих на глибині 800 м і закріплених анкерно-рамним кріпленням. Виконано розрахунок напруженого стану вуглепородного масиву і елементів кріплення. Показано, що в заданих гірничо-геологічних умовах використання анкерного кріплення дозволяє зберегти гірничу виробку і камеру порятунку в стійкому стані. Основний елемент перегородки між камерою і гірничою виробкою – міцна бетонна стінка – витримує високе навантаження і не руйнується.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Минеев, С.П., Беликов, И.Б., Могильченко, А.Н., Чекмезов, В.Н. & Сергеев Ю.Н. (2019). Обоснование параметров камеры спасения подземных работников на шахте «Добропольская». *Геотехнічна механіка*, (149), 150-159. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.150>.
2. Krukovskyi, O.P. & Krukovska, V.V. (2023). Supporting a mine working with a shelter in various mining and geological conditions. *Inżynieria Mineralna. Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, (1), 45-52. <http://doi.org/10.29227/ІМ-2023-01-05>.
3. Минеев, С.П. & Беликов, И.Б. (2019). Методология оценки параметров заложения камеры спасения в угольных шахтах, *Геотехнічна механіка*, (144), 126-136. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.126>.
4. *Пункт колективного рятування працівників шахти*. (2019). Патент на корисну модель № 134178. 10.05.2019. Бюл. № 9.
5. *Комплекс колективного порятунку працівників шахти*. (2019). Патент на корисну модель № 138076. 25.11.2019. Бюл. № 22.
6. СОУ 10.1.202020852.002:2006 *Стационарні камери-сховища рятувальні шахтні. Загальні технічні вимоги*. (2007). Київ: Мінвуглепром України, 16 с.
7. Krukovskyi, O.P. & Krukovska, V.V. (2023). Stability of underground shelters for collective rescue of coal mine workers. *Recent advances in global science. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, Vilnius, Lithuania, (170), 150-153.
8. Krukovska, V.V., Krukovskyi, O.P., Kocherga, V.M. & Kostrytsia, A.O. (2022). Solving coupled problems of geomechanics and gas filtration for mining safety ensuring. *Geo-Technical Mechanics*, (160), 106-122. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.106>.
9. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 756 p.
10. 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.
11. Hestenes, M.R. & Stiefel, E. (1952). Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, (49), 409-436.
12. Ibrahim, R., Mirhosseini, F. & Zsaki, A.M. (2022). An automated a priori knowledge-based p-adaptive three-dimensional finite element mesh improvement method

for stress analysis of underground excavations with prismatic cross-sections. *Geomechanics and Geoengineering*, (17), 141-154.

13. Krukovskiy, O., Krukovska, V., Vynohradov, Y. & Dyomin, V. (2021). Application of roof bolting to reduce water inflow into mine workings during the crossing of tectonic disturbances. *E3S Web of Conferences*, (280), 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128001006>.

14. Krukovskiy, O.P., Krukovska, V.V., Bulich, Yu.Yu. & Zemlianaia, Yu.V. (2020). Some aspects of development and application of the bearing-bolt supporting technology. *Resource-saving technologies of raw-material base development in mineral mining and processing*. Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: Universitas Publishing, 123-142. <https://doi.org/10.31713/m901>.

15. Krukovskiy, O.P., Krukovska, V.V. & Vynohradov, Yu.O. (2022). Development of roof bolting technology for application in gas- and water-bearing rocks. *Prospects for developing resource-saving technologies in mineral mining and processing*. Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: Universitas Publishing, 43-76. <https://doi.org/10.31713/m1103>.

16. Labuz, J.F. & Zang, A. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (45), 975-979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>.

17. Krukovskiy, O.P., Khvorostian, V.A. & Krukovskaia, V.V. (2013). Technology of supporting bolting of mine workings. *Coal of Ukraine*, (2), 13-16.

18. Krukovska, V.V. & Krukovskiy, O.P. (2019). Numerical simulation of coupled processes at injection of strengthening compositions in cracked rock with injection anchors. *Geotechnical Mechanics*, (149), 100-110. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.100>.

19. Булат, А.Ф. & Виноградов, В.В. (2002). *Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт*. Днепропетровск: Вильпо, 372 с.

## REFERENCES

1. Mineev, S.P., Belikov, I.B., Mogilchenko, A.N., Chekmezov, V.M. & Sergeev, Y.N. (2019). Ground of parameters of rescue chamber for underground workers in the Dobropolskaya mine. *Geo-Technical Mechanics*, (149), 150-159. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.150>.

2. Krukovskiy, O.P. & Krukovska, V.V. (2023). Supporting a mine working with a shelter in various mining and geological conditions. *Inżynieria Mineralna. Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, (1), 45-52. <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-05>.

3. Minieiev, S.P. & Belikov, I.B. (2019). Methodology for estimating the parameters of the deposition of the rescue camera in coal mine, *Geo-Technical Mechanics*, (144), 126-136. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.126>.

4. *Point of collective rescue of mine workers*. (2019). Utility model patent no. 134178. 10.05.2019. Bull. no. № 9.

5. *Complex of collective rescue of mine workers*. (2019). Utility model patent no. 138076. 25.11.2019. Bull. no. № 22.

6. JUU 10.1.202020852.002:2006 *Stationary rescue mines shelters. General technical requirements*. (2007). Kyiv: Ministry of Coal Industry of Ukraine, 16 p.

7. Krukovskiy, O.P. & Krukovska, V.V. (2023). Stability of underground shelters for collective rescue of coal mine workers. *Recent advances in global science. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, Vilnius, Lithuania, (170), 150-153.

8. Krukovska, V.V., Krukovskyi, O.P., Kocherga, V.M. & Kostrytsia, A.O. (2022). Solving coupled problems of geomechanics and gas filtration for mining safety ensuring. *Geo-Technical Mechanics*, (160), 106-122. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.106>.
9. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 756 p.
10. 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.
11. Hestenes, M.R. & Stiefel, E. (1952). Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, (49), 409-436.
12. Ibrahim, R., Mirhosseini, F. & Zsaki, A.M. (2022). An automated a priori knowledge-based p-adaptive three-dimensional finite element mesh improvement method for stress analysis of underground excavations with prismatic cross-sections. *Geomechanics and Geoengineering*, (17), 141-154.
13. Krukovskyi, O., Krukovska, V., Vynohradov, Y. & Dyomin, V. (2021). Application of roof bolting to reduce water inflow into mine workings during the crossing of tectonic disturbances. *E3S Web of Conferences*, (280), 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128001006>.
14. Krukovskyi, O.P., Krukovska, V.V., Bulich, Yu.Yu. & Zemlianaia, Yu.V. (2020). Some aspects of development and application of the bearing-bolt supporting technology. *Resource-saving technologies of raw-material base development in mineral mining and processing*. Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: Universitas Publishing, 123-142. <https://doi.org/10.31713/m901>.
15. Krukovskyi, O.P., Krukovska, V.V. & Vynohradov, Yu.O. (2022). Development of roof bolting technology for application in gas- and water-bearing rocks. *Prospects for developing resource-saving technologies in mineral mining and processing*. Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: Universitas Publishing, 43-76. <https://doi.org/10.31713/m1103>.
16. Labuz, J.F. & Zang, A. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, (45), 975-979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>.
17. Krukovskiy, O.P., Khvorostian, V.A. & Krukovskaia, V.V. (2013). Technology of supporting bolting of mine workings. *Coal of Ukraine*, (2), 13-16.
18. Krukovska, V.V. & Krukovskyi, O.P. (2019). Numerical simulation of coupled processes at injection of strengthening compositions in cracked rock with injection anchors. *Geotechnical Mechanics*, (149), 100-110. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.100>.
19. Bulat, A.F. & Vynogradov, V.V. (2002). *Bearing-bolt supporting of mine workings in coal mines*. Dnipropetrovsk: Vilpo, 372 p.

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Розробка способу дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку працівників шахти.

**Методика.** Задача про деформування в часі вуглепородного масиву з гірничою виробкою, камерою колективного порятунку і елементами їх кріплення розв'язувалась із застосуванням методу скінченних елементів.

**Результати.** Розроблено спосіб дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку, який полягає у створенні комп'ютерної моделі гірського масиву з гірничою виробкою, камерою колективного порятунку і їх кріпленням; чисельному розрахунку поля напружень і зон непружних деформацій в породах і кріпленні; аналізі стійкості бетонних

елементів кріплення камери колективного порятунку за максимальними напруженнями і характером деформування; аналізі стійкості приконтурних порід, які теж є одним з елементів конструкції підземних споруджень, за мінімальними напруженнями.

Для прикладу створено чисельну модель для дослідження стійкості елементів конструкції підземної камери колективного порятунку і гірничої виробки, закріплених анкерно-рамним кріпленням. Виконано розрахунок напруженого стану вуглепородного масиву і елементів кріплення. Показано, що в заданих гірничо-геологічних умовах використання анкерного кріплення дозволяє зберегти гірничу виробку і камеру порятунку в стійкому стані, а бетонна стінка між камерою і гірничою виробкою витримує високе навантаження і не руйнується.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано виконувати аналіз стійкості елементів конструкції камери колективного порятунку працівників шахти в два етапи: аналіз стійкості бетонних елементів кріплення за максимальними напруженнями і характером деформування; аналіз стійкості приконтурних порід за мінімальними напруженнями.

**Практична значимість.** Застосування запропонованого способу дозволить на етапі проектування дослідити та підвищити стійкість елементів конструкції підземних камер колективного порятунку, завдяки чому поліпшиться рівень безпеки працівників шахти.

**Ключові слова:** аналіз стійкості, елементи кріплення, підземна камера колективного порятунку, спосіб дослідження, чисельне моделювання

## **ABOUT AUTHORS**

Krukovskiy 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

Krukovska Viktoriia, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: vikakrukk@gmail.com

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