

УДК [622.831:622.273.217.4:539.3].001.57

**Ступнік М.І.**, д-р техн. наук, професор,  
**Калініченко В.О.**, д-р техн. наук, професор,  
**Калініченко О.В.**, канд. екон. наук, доцент,  
**Письменний С.В.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Федько М.Б.**, канд. техн. наук, доцент  
(ДВНЗ «КНУ»)

**МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ГІРСЬКОГО МАСИВУ ШАХТИ «ГІГАНТ-ГЛИБОКА» ПРИ  
ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЇ З ТВЕРДІЮЧОЮ ЗАКЛАДКОЮ**

**Ступник Н.И.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Калиниченко В.А.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Калиниченко Е.В.**, канд. экон. наук, доцент,  
**Письменный С.В.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Федько М.Б.**, канд. техн. наук, доцент  
(ГВУЗ «КНУ»)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ШАХТЫ «ГИГАНТ-ГЛУБОКАЯ»  
ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ С ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ**

**Stupnik N.I.**, D.Sc. (Tech), Professor,  
**Kalinichenko V.O.**, D.Sc. (Tech), Professor,  
**Kalinichenko O. V.**, Ph.D. (Econ.), Associate Professor,  
**Pysmennyi S.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**Fedko M.B.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
(SHEI “Kryviy Rih NU”)

**SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ROCKS AT THE  
“GIGANT GLUBOKAYA” UNDERGROUND MINE WHEN APPLYING A  
CONSOLIDATING BACKFILL TECHNOLOGY**

**Анотація.** Виконано дослідження та наведено практичний приклад вирішення задачі визначення напружено-деформованого стану масиву для умов шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК» з застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення. Дослідження виконано для ділянки масиву довжиною за простяганням понад 2,1 км та глибиною від денної поверхні близько 900 м. Розрахунок напружень та деформацій було проведено за допомогою програми «Ansys» версії 16.0. Моделювання виконано для двох випадків: у першому всі відпрацьовані камери є порожніми, у другому – всі камери заповнені твердіючою закладкою.

Встановлено, що рівень «просідання» денної поверхні є досить суттєвим для житлової забудови та об'єктів міської інфраструктури, які не допускають порушення денної поверхні та її руйнування. З іншого боку, враховуючи радіус кривизни просідання денної поверхні маємо досить малі зміщення, які не є критичними для, наприклад, дачних або гаражних кооперативів.

Доведено, що застосування твердіючої закладки для заповнення відпрацьованих очисних камер дозволяє зменшити напруження в масиві та забезпечити збереження земної поверхні у безпечному стані.

Результати моделювання мають високу збіжність з даними інструментальних спостережень. Це дозволяє стверджувати, що розроблена нами модель є адекватною гірничо-геологічним умовам Криворізького басейну й може бути використана для моделювання напружено-деформованого стану масиву та прогнозування подальшого розвитку процесів у гірських породах при відпрацюванні родовищ підземним способом.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, масив, деформації, напруження

### **Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями**

Видобуток залізної руди у Криворізькому залізорудному басейні здійснюється відкритим та підземним способами понад 130 років. У процесі видобутку залізних руд підземним способом застосовували системи розробки з масовим обваленням руди та налягаючих порід або з відкритим очисним простором. При застосуванні останніх у надрах землі залишалась значна кількість порожнин, загальний об'єм яких перевищує 100 млн.м<sup>3</sup> [1-4].

Більшість порожнин з часом була обвалена, що призвело до формування на денній поверхні зон обвалення. В той же час, в межах шахтних полів закритих та ліквідованих шахт залишилися пустоти, які є потенційною загрозою міста та його мешканцям. Так, 17.08.2010 р. в Центральній-Міському районі міста Кривого Рогу відбулося часткове обвалення земної поверхні з утворенням воронки в районі маркшейдерських осей 57–58 і лінії середнього простягання (ЛСП) від +30 до +50. Ділянка, на якій стався провал, знаходиться в шахтному полі бувшої шахти «ГПУ», закритої в 1972 р. Ділянка розташована над гірничими виробками, що утворилися в результаті виїмки залізних руд в період роботи шахти [5].

Крім цього, одним з небезпечних місць є ділянка шахтного поля ш. Гігант-Глибока в межах гірничого відводу колишнього рудоуправління ім. Дзержинського. До 1995 року рудник здійснював видобуток магнетитових кварцитів поверхово-камерною системою розробки у трьох поверхах 380-300 м, 540-460 м та 710-630 м. Підземна розробка магнетитових кварцитів за технологією «камера-цілик» привела до формування в надрах значної кількості пустот, які становлять потенційну небезпеку в разі їх обвалення.

Тому контроль за станом денної поверхні, деформації порід у зонах її підробки гірничими роботами, визначення напружено-деформованого стану масиву навколо очисних камер є актуальною науково-технічною проблемою.

### **Аналіз досліджень і публікацій**

Напружено-деформований стан гірського масиву суттєво залежить від ступеня його неоднорідності, зокрема, наявності структурних, тектонічних та інших порушень, які негативно впливають на технологічні процеси гірничих робіт. Тому інформація про такі порушення є вкрай необхідною як на стадії проектування, так і в процесі розробки родовища [6-7]. Однак досвід використання методів гірничої геофізики показав, що достовірність моніторингу породного масиву може бути забезпечена використанням відомих

методів тільки в комплексі з новими методами та технічними засобами на основі високопродуктивних інформаційних технологій.

Одним з ефективних методів моделювання гірського масиву є комп'ютерне моделювання численними методами та його синтез із моніторингом. Численні методи моделювання дозволяють враховувати як фізико-механічні властивості гірських порід, так і напружено-деформований стан гірського масиву в процесі видобутку корисних копалин із надр. Такі методи потребують значних потужностей для вирішення завдань високої обчислювальної складності. Цей факт обумовлює ефективність застосування сучасної комп'ютерної техніки для вирішення задач дослідження, моніторингу та прогнозування напружено-деформованого стану гірського масиву при видобутку корисних копалин різноманітними способами розробки.

На сьогоднішній день існує значна кількість прикладних програм, які дозволяють досліджувати напружено-деформований стан гірського масиву [8-10]. До таких програм можна віднести «SolidWorks», «Ліра», «Ansys», «GTSNX», «SCAD» та ряд інших. Дані програмні комплекси дозволяють моделювати поведінку гірського масиву, як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовища. Для вирішення задач, пов'язаних з визначенням характеристик поля напружень, деформацій масиву навколо виробленого простору можна виділити наступні програмні комплекси: «SolidWorks», «Ліра», «Ansys». Виконані розрахунки за розглянутими вище програмними комплексами показали хорошу збіжність отриманих результатів досліджень.

### **Постановка завдання**

Збереження непорушеної денної поверхні потребує оперативної оцінки величин діючих напружень в масиві, прогнозування характеру і причин їх зміни під час всього періоду ведення очисної виїмки. Ця інформація дозволяє оцінити існуючі умови та отримати вихідні дані для вдосконалення застосовуваних і розробки нових технологічних схем, здійснити вибір оптимальних параметрів ведення очисних робіт та визначити раціональну їх послідовність.

Метою представленої роботи є встановлення закономірностей змін напружено-деформованого стану масиву навколо очисних камер при підземному способі видобутку залізних руд та можливості керування напружено-деформованим станом масиву гірських порід при видобутку залізних руд з використанням твердуючої закладки.

### **Викладення матеріалу та результати**

Для оцінки впливу підземних гірничих робіт на стан денної поверхні в Криворізькому басейні та встановлення можливостей комп'ютерного моделювання складних геомеханічних процесів у гірському масиві було виконано дослідження однієї з проблемних ділянок гірничого відводу колишнього рудника ім. Дзержинського. Шахта «Гігант-Глибока» цього рудника відпрацьовувала магнетитові кварцити підземним способом. У трьох поверхах (380-300 м, 540-460 м та 710-630 м) було відпрацьовано понад 40 камер сумарним об'ємом у декілька мільйонів кубічних метрів.

Дослідження було виконано для ділянки масиву довжиною за простяганням понад 2,1 км та глибиною від денної поверхні понад 700 м. Розрахунок напружень та деформацій було проведено за допомогою програми «Ansys» версії 16.0. Моделювання виконано для двох випадків: у першому всі відпрацьовані камери є порожніми (як це є насправді), у другому – всі камери заповнені твердіючою закладкою. Основні фізико-механічні та пружні властивості гірського масиву та матеріалу закладки подано у таблиці 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні властивості гірської породи та матеріалу закладки

Параметри	Порода	Закладка
Модуль Юнга, МПа	50000	500
Питома вага, кН/м <sup>3</sup>	34,0	20,0
Межа міцності на розтягнення, МПа	14,0	0,2
Межа міцності на стиснення, МПа	140,0	2,0
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,15

Побудову епюр напружень та деформацій методом кінцевих елементів було здійснено шляхом розбиття 3D-моделі на чотирикутники з розміром сторони 6 м. Результати розрахунку поля напружень гірського масиву з порожніми камерами та із заповненими твердіючою закладкою наведено нижче (рис. 1, 2).

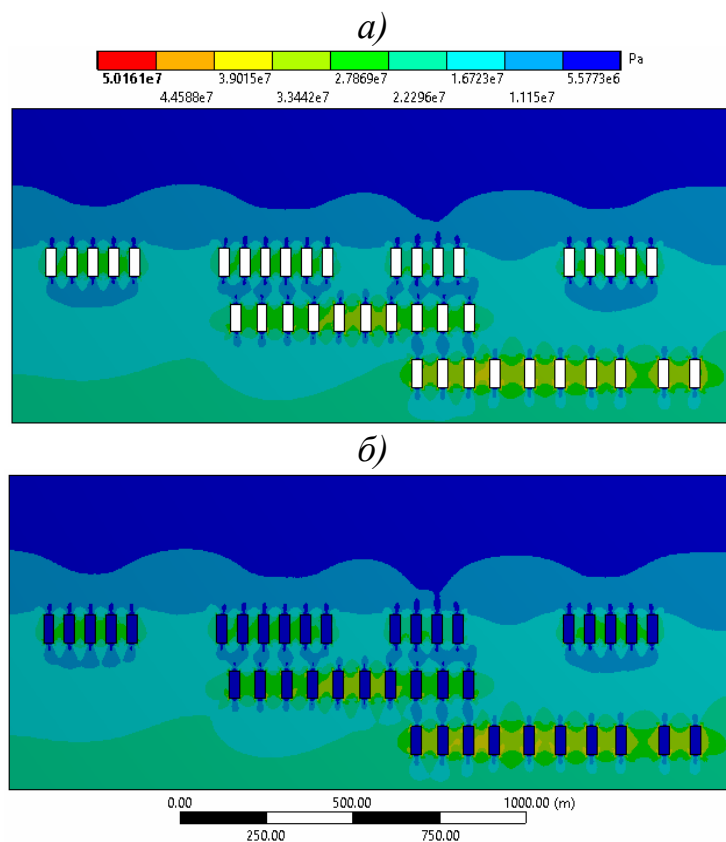


Рисунок 1 - Ізолінії напружень: *a* – порожні камери, *б* – камери із закладкою

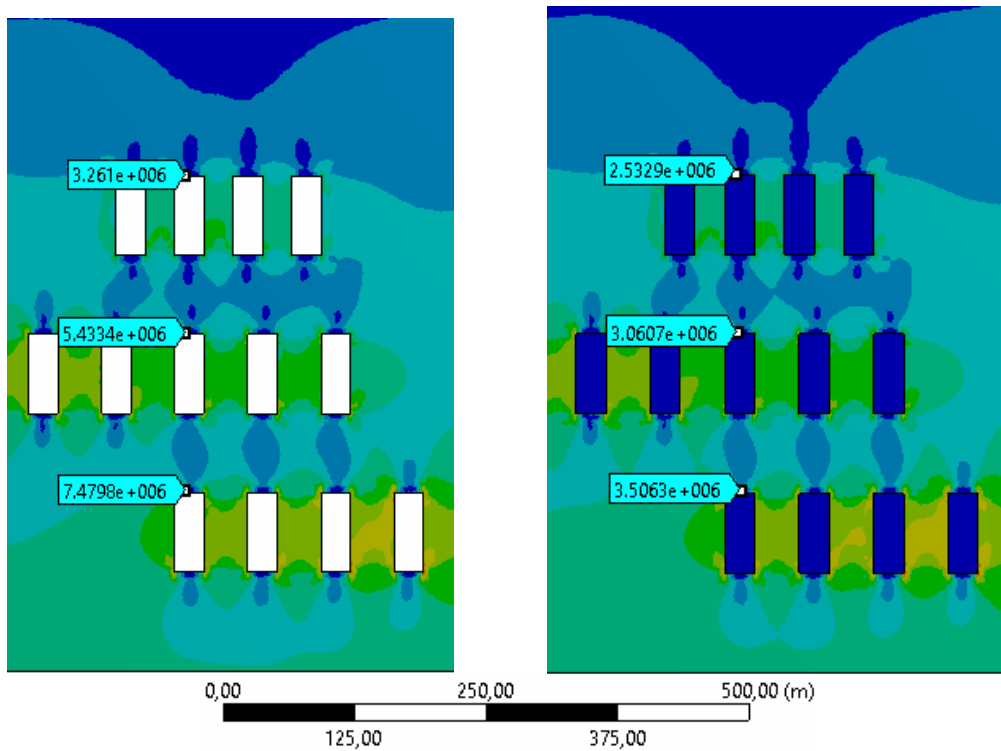


Рисунок 2 - Ізолінії напружень центральної частини блока із зазначеними величинами в покрівлі камер: *a* – порожні камери; *б* – камери із закладкою.

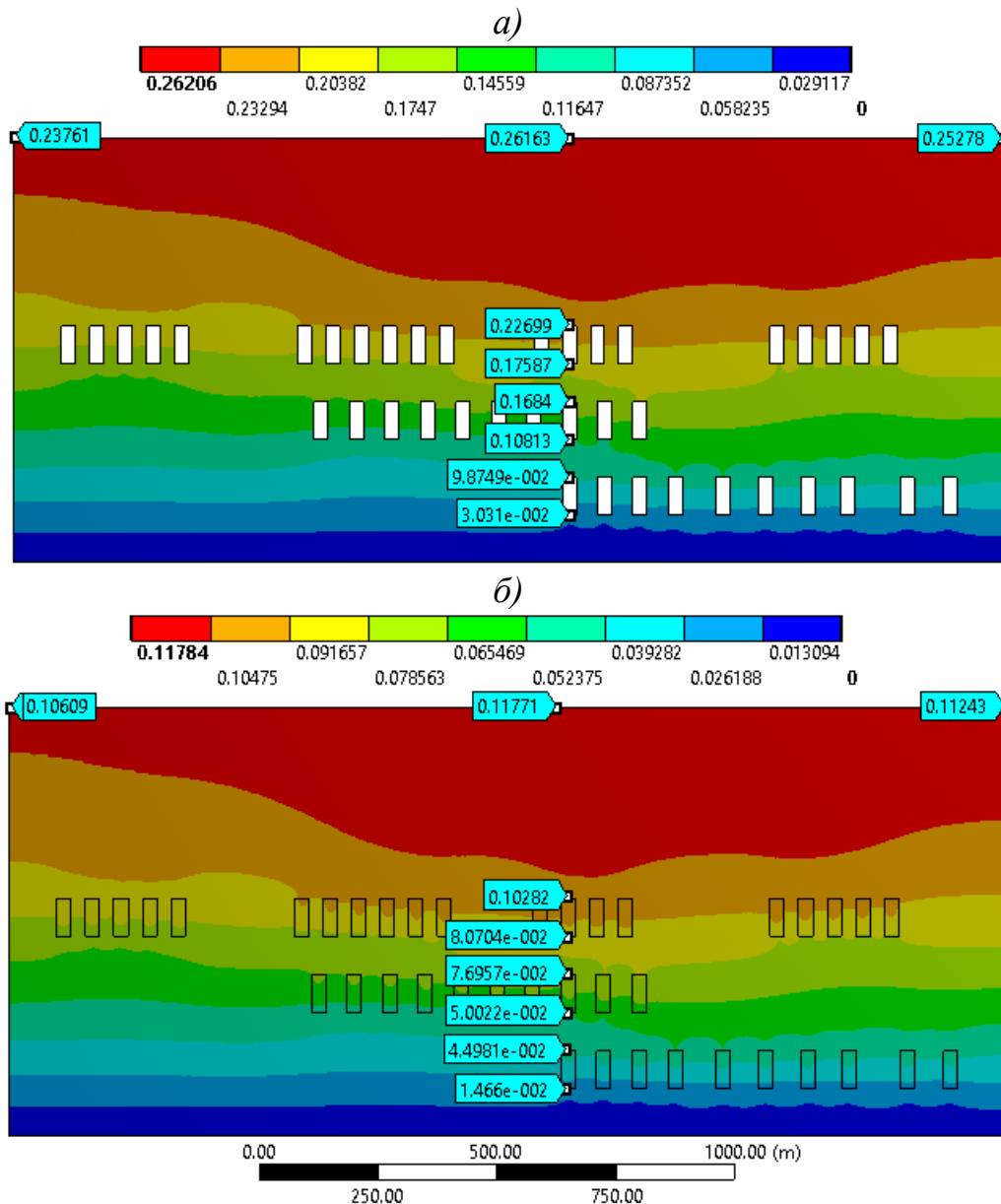
Як видно з рисунків, максимальний рівень стискуючих напружень зафіксовано у кутових зонах незакладених камер, де він склав 26-28 МПа. Це становить всього 18,5-20,0% від критичних значень для даного типу гірських порід (тобто магнетитових кварцитів), що свідчить про правильно вибрані параметри камер та ціликів. Це забезпечує довготривалу їх стійкість, що власне, й підтверджує більш ніж 30-річний досвід їх існування.

У випадку заповнення відпрацьованих камер твердіючою закладкою рівень напружень у ціликах та оточуючому масиві є на 11-16% меншим.

Максимальний рівень деформацій на денній поверхні має місце у центральній частині ділянки гірського масиву, що моделювалась: при порожніх камерах він становить близько 260 мм, при закладених камерах – всього 118 мм, що є у 2,2 рази меншим (рис. 3).

Отримані значення «просідання» денної поверхні над місцями ведення підземних гірничих робіт добре узгоджуються з результатами даних інструментальних спостережень за вертикальними зміщеннями, виконаними у нашому регіоні О. Є. Куліковською [11-14].

За її даними деформації земної поверхні у Криворізькому басейні зафіксовано на відстані 4,5 км від місця проведення гірничих робіт. На найбільш небезпечних ділянках вертикальні зміщення досягають 275 мм, а відносна швидкість осідання поверхні може сягати 8-10 мм/рік. Тобто результати моделювання є відповідають деформаціям у природі і опрацьована модель може бути застосована для прогнозування подальшого розвитку цих процесів.



а – порожні камери, б – камери із закладкою.

Рисунок 3 - Епюри деформацій гірського масиву:

Порівнюючи розрахункові значення деформацій денної поверхні з даними інструментальних спостережень за вертикальними зміщеннями, визначимо збіжність одержаних результатів. Похибка розрахункових методів не перевищує 10–12 %.

Таким чином, результати моделювання мають високу збіжність з даними інструментальних спостережень. Отже, розроблена нами модель є адекватною гірничо-геологічним умовам Криворізького басейну й може бути використана для моделювання напружено-деформованого стану масиву та прогнозування подальшого розвитку процесів у гірських породах при відпрацюванні родовищ підземним способом.

## Висновки

Встановлений рівень «просідання» денної поверхні є, з одного боку, досить суттєвим, оскільки на поверхні у цьому районі знаходиться інтенсивна житлова забудова та об'єкти міської інфраструктури (зокрема дороги, комунікації), які не допускають порушень денної поверхні та їх руйнування. З іншого боку, враховуючи радіус кривизни просідання денної поверхні, маємо відносно малі зміщення, які не є критичними для, наприклад, дачних або гаражних кооперативів тощо.

Доведено, що застосування твердіючої закладки для заповнення відпрацьованих очисних камер дозволяє зменшити напруження в масиві та забезпечити збереження земної поверхні у безпечному стані.

Також треба враховувати, що в надрах у вищезазначеній ділянці гірничого відводу знаходиться біля 200 млн. т запасів високоякісних магнетитових кварцитів, які можуть стати об'єктом подальшого видобутку. У такому випадку баланс даної літосистеми буде порушено і прирощення обсягів незаповнених порожнин (відпрацьованих камер) може становити потенційну загрозу. Моделювання такої ситуації планується здійснити на наступному етапі досліджень. Також планується дослідити рівень деформації денної поверхні навхрест простягання родовища, де за нашими припущеннями різниця в опусканні поверхні буде більш суттєвою і де значний вплив на геомеханічні процеси, що протікають у гірському масиві, має існуюча зона обвалення від випереджаючої відробки багатих залізних руд, яка знаходиться у висячому боці покладу магнетитових кварцитів.

---

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stupnik, N. Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin / N. Stupnik., V. Kalinichenko // Geomechanical Processes During Underground Mining. School of Underground Mining. – Dnipropetrovsk, 2012. – pp 15-19.
2. Ступнік, М.І. Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу / М.І. Ступнік, О.В. Калініченко, В.О. Калініченко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2012. – № 6. – С. 126-130.
3. Stupnik, N. Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme / N. Stupnik, V. Kalinichenko, V. Kolosov, S. Pismennyu, M. Fedko // Metallurgical and mining industry. - 2014 - No.2. pp 89-93.
4. Stupnik, N. Modeling of stopes in soft ores during ore mining / N.Stupnik, V. Kalinichenko, V. Kolosov [and others] // Metallurgical and mining industry/ - 2014/ - No.3. – pp 32-36.
5. <http://www.0564.ua>.
6. Калініченко, О.В. Визначення сутності поняття комплексної системи економічної оцінки геомеханічних ризиків / О.В. Калініченко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – №3. – С. 100-102.
7. Buskov, E. The calculation of stress intensity factors using the finite element method with cracked elements / E.Bushkov // Int. J.Fract. Mech., – 1970. - 6 – pp. 159-167.
8. Tracey, D.M. Finite elements for determination of crack tip elastic stress, intensity factors / D.M. Tracey // Eng. Fract. Mech. – 1971. – 3. - pp. 255-265.
9. Walsh, P.F. The computation of stress intensity factors by a special finite element technique / P.F. Walsh // Int. J. Solids and Struct – 1971. – 7/ - pp. 1333-1342.
10. Small scale yielding near a crack in plane strain A finiteelement analysis / N.Levy, P. Marcal, W. Ostergren, J. Rice J. // Int. J. Fract. Mech. – 1971. – 1. -pp. 143-156.

11. Куліковська, О.Є. Співставлення сучасних рухів земної поверхні Криворізького залізрудного басейну з особливостями будови його геологічного середовища / О.Є. Куліковська // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2004. – Вип. 24. – С. 52-57.

12. Куликовская, О.Е. Вертикальные смещения реперов геодинамического полигона на территории эксплуатируемого железорудного месторождения / О.Е. Куликовская, В.Д. Сидоренко // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2010. – Вып. 93. – С. 81-86.

13. Куліковська, О.Є. Дослідження процесу зсуву поверхні і об'єктів при підземній розробці родовища ПАТ «Євраз Суха Балка» / О.Є. Куліковська // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 30. – С. 30-34.

14. Куліковська, О.Є. Концептуальні засади маркшейдерського моніторингу безпечного функціонування гірничодобувних регіонів: автореф. дис. д-ра техн. наук. – Кривий Ріг, ДВНЗ «Криворізький національний університет», 2012. – 36 с.

15. Строительные нормы и правила. Ч. 2. Нормы проектирования. Гл. 8. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях. СНиП II-8-78. – М.: Стройиздат, 1979. – 23 с.

#### REFERENCES

1. Stupnik, N. and Kalinichenko V. (2012), "Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin" / N. Stupnik., V. Kalinichenko // *Geomechanical Processes During Underground Mining. School of Underground Mining.* – Dnipropetrovsk, 2012. – pp 15-19.

2. Stupnik, N.I., Kalinuichsnko, O.V. and Kalinichenko, V.O. (2012), "Economic estimation risks of possible geo-mechanical violations of daily surface in the fields of the Krivbass mines", *Scientific announcer of the National mining university*, no. 6, pp. 126-130.

3. Stupnik, N., Kalinichenko, V., Kolosov, V., Pismennyu, V. and Fedko, M. (2014), "Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme", *Metallurgical and mining industry.*, No.2., pp 89-93.

4. Stupnik, N., Kalinichenko, V., Kolosov, V. [and others] (2014), "Modeling of stopes in soft ores during ore mining", *Metallurgical and mining industry.*, - No.3. – pp 32-36.

5. <http://www.0564.ua>.

6. Kalinichenko, O.V. (2010), "Determination essences of concept of the complex system of economic evaluation of geo-mechanical risks", *Scientific announcer of the National mining university*, no. 3., pp. 100-102.

7. Buskov, E. (1970), "The calculation of stress intensity factors using the finite element method with cracked elements", *Int. J. Fract. Mech.*, no. 6, pp. 159-167.

8. Tracey, D.M. (1971), "Finite elements for determination of crack tip elastic stress, intensity factors", *Eng. Fract. Mech.*, no.3, pp. 255-265.

9. Walsh, P.F. (1971), "The computation of stress intensity factors by a special finite element technique", *Int. J. Solids and Struct.*, no. 7, - pp. 1333-1342.

10. Levy, N., Marcal, P., Ostergren, W. and Rice J. (1971), "Small scale yielding near a crack in plane strain A finiteelement analysis", *Int. J. Fract. Mech.*, no. 1, -pp. 143-156.

11. Kulykovska, O.Ye. (2004), "Comparison of modern motions of earthly surface of the Kryvyi Rih basin pool with the features of structure of his geological environment", *Announcer of the Kryvyi Rih technical university*, no. 24. – С. 52-57.

12. Kulykovska, O.Ye. and Sidorenko, V.D. (2010), "Vertical displacements of reперov of geodynamical ground of on territory of the exploited iron-ore deposit", *Development of ore deposits.*, Krivoy Rog, no. 93., pp. 81-86.

13. Kulykovska, O.Ye. (2012), "Research process of change of surface and objects at underground development of the deposit PAS «Yevraz Sukha Balrka», *Announcer of the Kryvyi Rih national university*, no. 30, pp. 30-34.

14. Kulykovska, O.Ye. (2012), "Conceptual bases of the surveyor monitoring of the safe functioning of mining regions", Abstract of D. Sc. dissertatson, SHEI "KrNU", Krivoy Rog, UA.

15. СНиП II-8-78. Build norms and governed. (1979), Part 2. Norms of planning., Ch. 8. Buildings and buildings the on earned additionally territories, Stroyydat, Moscow, SU.

---

#### Про авторів

**Ступнік Микола Іванович**, доктор технічних наук, професор, ректор Державного вищого



навчального закладу "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), професор кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна

**Калініченко Всеволод Олександрович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна, [vsevolod921@mail.ru](mailto:vsevolod921@mail.ru)

**Калініченко Олена Всеволодівна**, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна

**Письменний Сергій Васильович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна, [psvknu@gmail.com](mailto:psvknu@gmail.com)

**Федько Михайло Борисович**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна

#### About the authors

**Stupnik Mykola Ivanovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Rector of State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Professor in the Department of Underground Mining Deposits of Mineral Resources in the State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Kryvyi Rih, Ukraine

**Kalinichenko Vsevolod Oleksandrovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department of Underground Mining Deposits of Mineral Resources in the State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Kryvyi Rih, Ukraine, [vsevolod921@mail.ru](mailto:vsevolod921@mail.ru)

**Kalinchenko Olena Vsevolodivna**, Candidate of Economical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Underground Mining Deposits of Mineral Resources in the State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Kryvyi Rih, Ukraine

**Pysmennyi Sergiy Vasylyovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Underground Mining Deposits of Mineral Resources in the State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Kryvyi Rih, Ukraine, [psvknu@gmail.com](mailto:psvknu@gmail.com)

**Fedko Mykhaylo Borysovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Underground Mining Deposits of Mineral Resources in the State Higher Educational Institution "Kryviy Rih National University" (SHEI "Kryviy Rih NU"), Kryvyi Rih, Ukraine

**Аннотация.** Выполнено исследование и приведен практический пример решения задачи определения напряженно-деформированного состояния массива для условий шахты «Гигант-Глубокая» ЧАО «ЦГОК» с применением специализированного программного обеспечения. Исследование выполнено для участка массива длиной по простиранию свыше 2,1 км и глубиной от дневной поверхности около 900 м. Расчет напряжений и деформаций был проведен с помощью программы «Ansys» версии 16.0. Моделирование выполнено для двух случаев: в первом все отработанные камеры являются пустыми, во втором – все камеры заполнены твердеющей закладкой.

Установлено, что уровень «проседания» дневной поверхности является достаточно существенным для жилищной застройки и объектов городской инфраструктуры, не допускающих нарушения дневной поверхности и ее разрушения. С другой стороны, с учетом радиуса кривизны проседания дневной поверхности, имеют место достаточно малые смещения, не являющиеся критическими для, например, дачных или гаражных кооперативов.

Доказано, что применение твердеющей закладки для заполнения отработанных очистных камер позволяет уменьшить напряжение в массиве и обеспечить сохранение земной поверхности в безопасном состоянии.

Результаты моделирования имеют высокую сходимость с данными инструментальных

наблюдений. Это позволяет утверждать, что разработанная модель адекватна горно-геологическим условиям Криворожского бассейна и может быть использована для моделирования напряженно-деформированного состояния массива и прогнозирования последующего развития процессов в горных породах при отработке месторождений подземным способом.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, массив, деформации, напряжения

**Annotation.** The paper presents results of the research and solution of practical task of defining stress-strain state of the massif in conditions of the “Gigant-Glubokaya” underground mine at the PJSC “CGOK” with the help of special software. The research was conducted in the site of 2.1 km long along the strike and 900 m deep. All the calculations have been performed on the basis of *Ansys* 16.0. The simulation was made for two cases: empty dead stopes and stopes filled with consolidating fillers.

It is defined that with empty stopes level of the daylight surface subsidence is rather significant, and it is unacceptable for residential development and urban infrastructure. However, the curvature radius of such displacements develops quite small movements not critical for territories with dacha (country house) or garage communities.

Use of consolidating filler in the backfilling dead stopes was proved for decreasing stress in the massif and preserving the surface ground.

The simulation results possess high convergence to instrumental observation data. This allows to conclude that the developed model is adequate to the mining and geological conditions of Kryvyi Rih basin and can be used for simulating stress-strain state of the massif and forecasting further development of processes in rocks during underground mining operations.

**Key words:** stress-strain state, massif, strain, stress

*Статья поступила в редакцию 4.09.2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.А. Курносовым*