

Ступнік М. І. /д. т. н./, Калініченко В. О. /д. т. н./,  
Калініченко О. В. /к. е. н./, Музика І. О. /к. т. н./,  
Федько М. Б. /к. т. н./, Письменний С. В. /к. т. н./  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

## Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву покладу магнетитових кварцитів в умовах шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК»

*Наведено практичний приклад вирішення задачі визначення напружено-деформованого стану масиву та його деформацій для умов шахт Кривбасу з застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення. Доведено, що контроль процесів деформування масиву гірських порід і керування його станом відповідно до геомеханічних умов особливо актуальні для зменшення витрат на охорону і експлуатацію гірничих виробок та збереження земної поверхні у безпечному стані. Іл. 3. Табл. 1. Бібліогр.: 15 найм.*

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

*A practical example of solving problem of determining the stress-deformed state of rocks and its strain for conditions of Kryvyi Rih mines using specialized software. It is proved that the control of the rock mass deformation processes and its condition according to the geomechanical conditions are particularly relevant to reducing the cost of protection and exploitation of mines and preserve the earth's surface in a safe condition.*

**Keywords:** stress-strain state, array, strain, stress

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

Криворізький залізорудний басейн веде видобуток корисних копалин відкритим та підземним способами понад 100 років. У процесі видобутку залізних руд підземним способом застосували системи розробки з масовим обваленням руди та налягаючих порід і з відкритим очисним простором. При застосуванні системи розробки з відкритим очисним простором у надрах землі залишилась значна кількість порожнин загальним об'ємом понад 100 млн м<sup>3</sup> [1-4].

Близько 30 % порожнин, що залишились після видобутку залізних руд, з часом було обвалено, сформувавши на денній поверхні зони обвалення. Так, у 2012 році після чергового самообвалення ціликів та заповнення порожнини вміщувачими породами у Центральній-міському районі міста Кривого Рогу утворилась воронка обвалення, яка розташована у 50 м від автомобільної дороги та 150 м до автостанції [5].

Ще одною з небезпечних місць є дільниця в межах гірничого відводу колишнього рудника ім. Дзержинського. До 1995 року рудник вів видобуток магнетитових кварцитів поверхово-камерною системою розробки з залишанням міжкамерних ціликів у трьох поверхах (380-300 м, 540-460 м та 710-630 м). У безпосередній близькості з гірничим відводом на денній поверхні знаходяться технологічні комплекси шахт, під'їзні залізничні колії, Придніпровська

залізниця, житлові та соціально-культурні об'єкти. Тому, контроль за станом денної поверхні, зсувом порід у зонах підробки земної поверхні, визначення напружено-деформованого стану масиву навколо очисних камер є вельми актуальним.

### Аналіз досліджень і публікацій

Відомо, що напружено-деформований стан масиву суттєво залежить від ступеня його неоднорідності, зокрема, наявності структурних, тектонічних, тектоно-карстових та інших порушень, присутність яких негативно впливає і на технологічний процес 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 прогресивних інформаційних технологій.

Одним з прогресивних технологій моніторингу породного масиву є комп'ютерне моделювання численними методами. Численні методи моделювання враховують фізико-механічні властивості неоднорідних гірських масивів, потребують значних потужностей для вирішення завдань високої обчислювальної складності. Цей факт обумовлює ефективність застосування сучасної комп'ютерної техніки для вирішен-

ня задач дослідження, моніторингу та прогнозування напружено-деформованого стану гірського масиву при видобутку корисних копалин різноманітними способами розробки.

В даний час існує значна кількість прикладних програм, які дозволяють визначити напружено-деформований стан (НДС) гірського масиву [8-10]. До таких програм можна віднести «SolidWorks», «Ліра», «Ansys», «GTSNX», «SCAD» та ряд інших. Дані програмні комплекси дозволяють досліджувати гірський масив, як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовища. Для вирішення задач, пов'язаних з визначенням 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**

Для збереження денної поверхні необхідна оперативна оцінка величин діючих напружень в масиві, прогнозування характеру і причин їх зміни під час всього періоду ведення очисної виїмки, що дозволить 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.

**Мета роботи**

Встановлення закономірностей зміни 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 твердої 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. Держинського, де у трьох поверхах (380-300 м, 540-460 м та 710-630 м) 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 від денної поверхні на глибину 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 по-

рожніми (як це є насправді), а у другому – всі камери заповнені твердою закладкою. Основні фізико-механічні та пружні властивості гірської породи та матеріалу закладки подано у таблиці.

*Таблиця*

**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

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

Як видно з рисунків, максимальний рівень стискуючих напружень зафіксовано у куткових зонах незакладних 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 твердою закладкою рівень напружень у ціликах та оточуючому масиві є на 11-16 % меншим.

Максимальний рівень деформацій має місце на денній поверхні у центральній частині ділянки гірського масиву, який підлягав моделюванню: при порожніх камерах він становить близько 262 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 денних 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 сягають величин до 275 мм, а відносна швидкість осідання поверхні може сягати 8-10 мм/рік. Тобто результати моделювання є реалістичними і опрацьована модель може бути

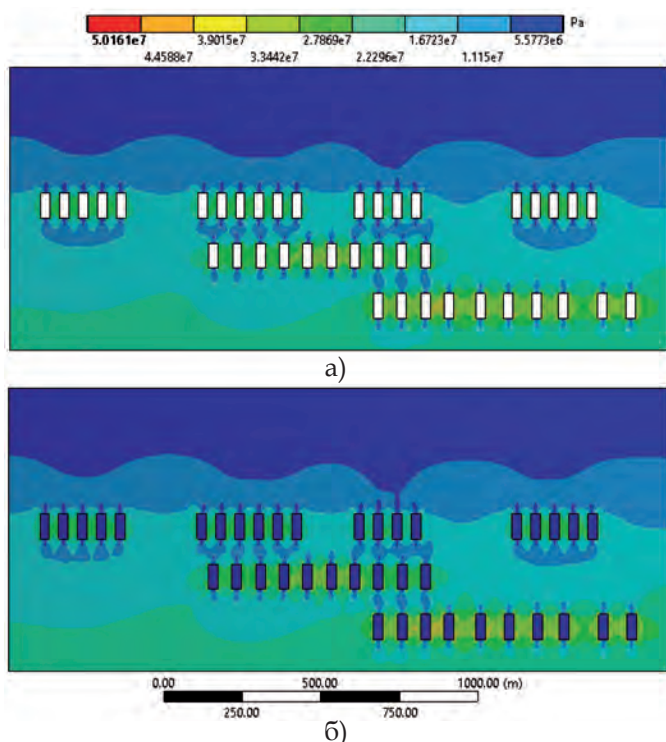


Рис. 1. Ізолінії напружень:  
а – порожні камери; б – камери із закладкою

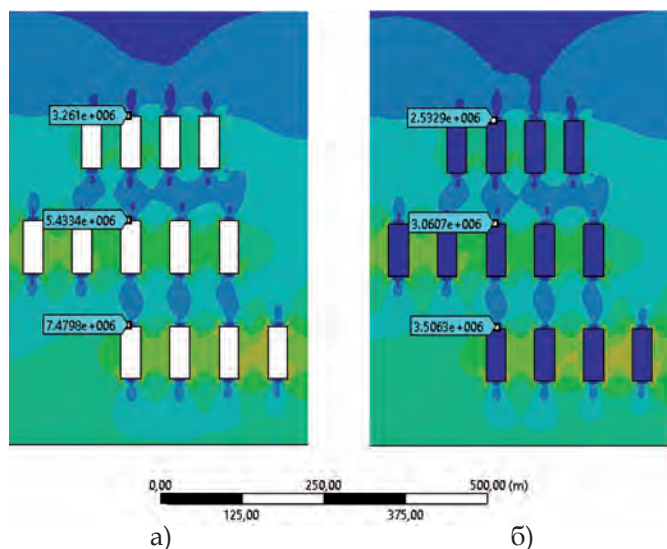


Рис. 2. Ізолінії напружень центральної частини блока із зазначеними величинами в покрівлі камер: а – порожні камери; б – камери із закладкою

застосована для прогнозування подальшого розвитку цих процесів.

**Висновки**

Встановлений рівень «просідання» денної поверхні є, з одного боку, досить суттєвим, оскільки на поверхні у цьому районі знаходиться інтенсивна житлова забудова та багато об'єктів міської інфраструктури (зокрема дороги, різні комунікації), які не допускають порушення денної поверхні для уникнення їх руйнування. З ін-

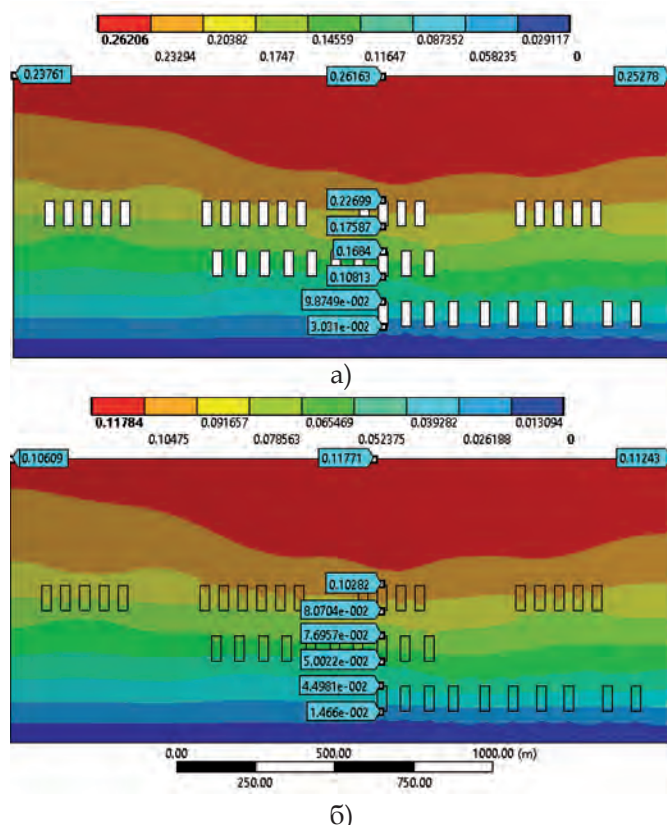


Рис. 3. Епюри деформацій гірського масиву:  
а – порожні камери; б – камери із закладкою

шого боку, враховуючи радіус кривизни цього зміщення маємо, що на 100 м відрізку поверхні по горизонталі зміщення по вертикалі складає всього 1-2 мм, що не спричиняє ніяких руйнувань, оскільки є значно меншим від критичних величин деформацій ( $\epsilon = 1,0 \text{ мм/м}$ ), згідно діючих будівельних норм для будівель та споруд, що знаходяться на відпрацьованих територіях [15]. Але при цьому час є одним із суттєвих факторів, який буде сприяти і подальшому опусканню земної поверхні на цій ділянці. Якщо деформації будуть розвиватися у часі як і дотепер, то ніякої загрози, скоріш за все, це не становитиме.

Також треба враховувати, що в надрах у вищезазначеній ділянці гірничого відводу ще 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 всячому боці покладу магнетитових кварцитів.

### Бібліографічний список

1. Stupnik N., Kalinichenko V. Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin, Geomechanical Processes During Underground Mining. School of Underground Mining. – Dnipropetrovs'k. – 2012. – P. 15-19.

2. Ступнік М. І., Калініченко О. В., Калініченко В. О. Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ. – 2012. – № 6. – С. 126-130.

3. Stupnik N., Kalinichenko V., Kolosov V., Pismennyu S., Fedko M. Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme, Metallurgical and mining industry, No. 2. – 2014. – P. 89-93.

4. Stupnik N., Kalinichenko V., Kolosov V., Pismennyu S., Shepel A. Modeling of stopes in soft ores during ore mining, Metallurgical and mining industry, No. 3. – 2014. – P. 32-36.

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

6. Калініченко О. В. Визначення сутності поняття комплексної системи економічної оцінки геомеханічних ризиків / 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, Int. J. Fract. Mech, 6, 1970. – P. 159-167.

8. Tracey D. M. Finite elements for determination of crack tip elastic stress, intensity factors, Eng. Fract. Mech., 3, 1971. – P. 255-265.

9. Walsh P.F. The computation of stress intensity factors by a special finite element technique, Int. J. Solids and Struct., 7, 1971. – P. 1333-1342.

10. Levy N., Marcal P., Ostergren, W., Rice J. Small scale yielding near a crack in plane strain. A finiteelement analysis, Int. J. Fract. Mech. 1, 1971. – P. 143-156.

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

12. Куликовская О. Е., Сидоренко В. Д. Вертикальные смещения реперов геодинамического полигона на территории эксплуатируемого железорудного месторождения // 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» // 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. на здобуття наук. ступеня 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.

**Поступила 10.07.2015**

