

М.І. СТУПНІК, В.О. КАЛІНІЧЕНКО, доктори техн.наук, професори,  
О.В. КАЛІНІЧЕНКО, канд.екон.наук, доц., Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ ПОКЛАДУ КАМЕРНИМИ СИСТЕМАМИ РОЗРОБКИ З ЗАКЛАДКОЮ КАМЕР ВІДХОДАМИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

**Мета.** Метою даної роботи є аналіз дослідження еволюції напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні покладу камерними системами розробки з закладкою виробленого простору відходами гірничого виробництва.

**Методи дослідження.** Детальний техніко-економічний аналіз і дослідження факторів і умов, що впливають на ефективність діагностування і обліку силових взаємодій і трансформацій природного і штучного полів напружень при формуванні очисних камер і їх наступній закладці відходами гірничого виробництва виконувались математичними методами із застосуванням методу кінцевих елементів та програмного комплексу Ansys 16.2.

Стан і параметри напружено-деформованого стану масиву на ділянці рудного покладу досліджувався з урахуванням етапного характеру навантаження гірських порід. Кількість розрахункових етапів в дослідженні приймалася аналогічною кількості технологічних циклів очисних робіт при відпрацюванні шахтного поля.

**Наукова новизна.** Дослідженнями встановлені нові закономірності змін напружено-деформованого стану масиву при початковому, проміжному та кінцевому етапах відпрацювання камер на ділянці, що діагностується.

Встановлена величина інверсії вертикальних деформацій гірського масиву при поетапному відпрацюванні та наступному заповненні камери подрібненими пустими породами, що дозволяє встановити закономірності впливу об'ємного стиснення на стійкість комбінованих штучних масивів.

**Практична значимість.** Виконаними дослідженнями розроблена та запропонована ефективна технологія відпрацювання та закладки камер відходами виробництва, що дозволяє утилізувати відходи гірничо-металургійних підприємств у відпрацьованому підземному просторі камер другої черги.

**Результати.** На підставі виконаних досліджень та встановлених залежностей запропоновані оптимальні варіанти технології закладки камер другої черги пустими породами. Запропонована технологія забезпечує необхідну несучу здатність штучних ціликів твердіючої закладки камер першої черги, оскільки створює умови об'ємного стиснення для всього комбінованого закладного масиву та дозволяє утилізувати відходи гірничо-металургійних підприємств у відпрацьованому підземному просторі камер другої черги, вирішуючи одну з головних екологічних проблем Криворізького залізрудного басейну.

**Ключові слова:** руда, камерні системи, закладка, напруження, деформації, вплив на довкілля.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-3-8

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Підземна розробка залізних руд в Криворізькому басейні здійснюється камерними системами розробки та системами з обваленням руди і вміщуючих порід. Відпрацювання залізних руд підземним способом призводить до порушень денної поверхні. В розвинутих гірничодобувних країнах підземна розробка родовищ корисних копалин в міських межах здійснюється виключно системами з закладкою виробленого простору. Для нашої країни відпрацювання руд середньої цінності такими системами розробки є надто витратним. Тому зниження вартості закладних робіт та дослідження і розробка відповідних технологій є актуальною задачею, яка має важливе наукове та практичне значення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На сьогодні дослідження та розробка теоретичних основ впливу штучного поля напружень на розвиток геомеханічних процесів при виїмці залізних руд в Криворізькому басейні камерними системами розробки є досить складним і невідомим процесом. Це пов'язане насамперед з тим, що з часом збільшується глибина розробки, зростає гірський тиск, погіршуються гірничо-геологічні умови відпрацювання родовищ. Значні площі земної поверхні, підпрацьовані гірничими роботами, є схильними до обвалення. Тому сучасні дослідження направлені на вирішення цієї проблеми [1-10]. Діагностування і облік силових взаємодій природного і штучного полів напружень і їх вплив на досліджуваній ділянці родовища доцільно виконувати з урахуванням етапного характеру навантаження гірських порід, застосовуючи сучасні математичні методи та програми комп'ютерного моделювання [1-5, 11-15].

Існує значна кількість прикладних програм, які дозволяють з певними наближеннями визначати параметри напружено-деформованого стану гірського масиву. До таких програм можна

віднести «SolidWorks», «Ліра», «Ansys», «GTSNX», «SCAD» і ряд інших. Ці програмні комплекси дозволяють досліджувати гірський масив як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовищ. У даній роботі розрахунок напружень і деформацій виконувався за допомогою програм Ansys 16.2 [1-7].

**Постановка завдання.** В роботі досліджуються фактори та умови, які впливають на ефективність діагностування і обліку силових взаємодій і еволюційних трансформацій штучного поля напружень при відпрацюванні покладу камерними системами розробки з закладкою камер відходами гірничого виробництва. Тому метою даної роботи є аналіз та дослідження змін напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні покладу камерними системами розробки з закладкою виробленого простору відходами гірничого виробництва.

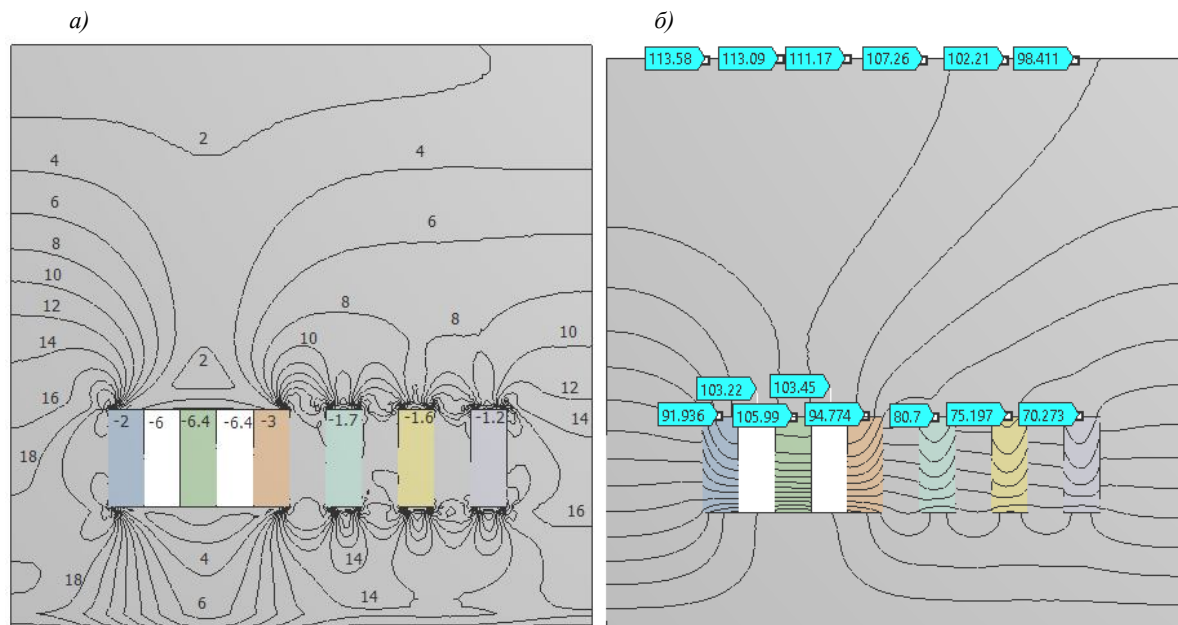
**Викладення матеріалу та результати.** Математичні методи досліджень, зокрема чисельне моделювання дозволяють визначити закономірності трансформації напружено-деформованого стану масиву відпрацюванні та закладці камер на ділянці, що діагностується.

Для отримання необхідних чисельних значень, дослідження напружено-деформованого стану масиву доцільно розбити на етапи, прив'язані до технологічних циклів відпрацювання покладів. Дана методика є похідною розрахунковому метода «послідовних циклів». Відповідно до неї при відпрацюванні ділянки шахтного поля здійснюються наступні технологічні етапи:

- відпрацювання камер першої черги;
- заповнення відпрацьованих камер твердіючою закладкою;
- відпрацювання камер другої черги;
- закладка відпрацьованих камер другої черги відходами гірничого виробництва.

У контексті поставлених задач технологічні етапи слід розглядати як процес перерозподілу напружень між гірським масивом, закладкою і обваленими пустими породами, при цьому навантаження в кожному наступному етапному циклі визначається з урахуванням попереднього технологічного циклу.

Рис. 1 ілюструє напружено-деформований стан масиву при початковому етапі відпрацювання камер другої черги на ділянці, що діагностується. На цей час, згідно існуючим технологічним схемам, закладний масив камер першої черги набрав необхідну нормативну міцність, яка повинна забезпечувати стійкість вертикальних оголень штучних ціликів камер першої черги на весь термін відпрацювання сусідніх очисних камер другої черги.



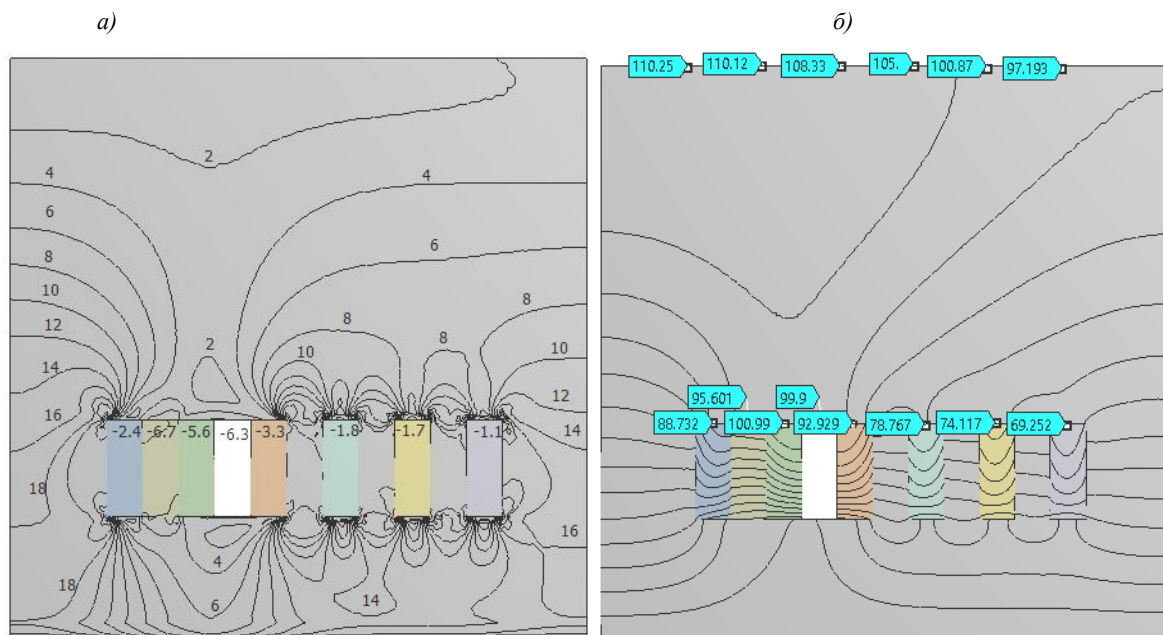
**Рис. 1.** Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при початковому етапі відпрацювання камер другої черги

Представлені ізолінії головних напружень та результати розрахунку деформацій денної поверхні і гірського масиву в контрольних точках шахтного поля дозволяють встановити принципові особливості трансформації напружено-деформованого стану гірського масиву.

Основною закономірністю є істотне збільшення деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контакті з стелінами відпрацьованих камер.

Варіація відповідних величин деформацій в контрольних точках гірського масиву досягає 34–36 % в порівнянні з початковим етапом відпрацювання шахтного поля на ділянці, що діагностується.

На рис. 2 представлені зміни напружено-деформованого стану масиву при початковому етапі заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами в якості недорогої інертної закладки очисного простору камер другої черги відпрацювання. Ця технологія забезпечує також утилізацію пустих порід від проведення гірничих виробок.



**Рис. 2.** Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при початковому етапі заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами в якості закладки

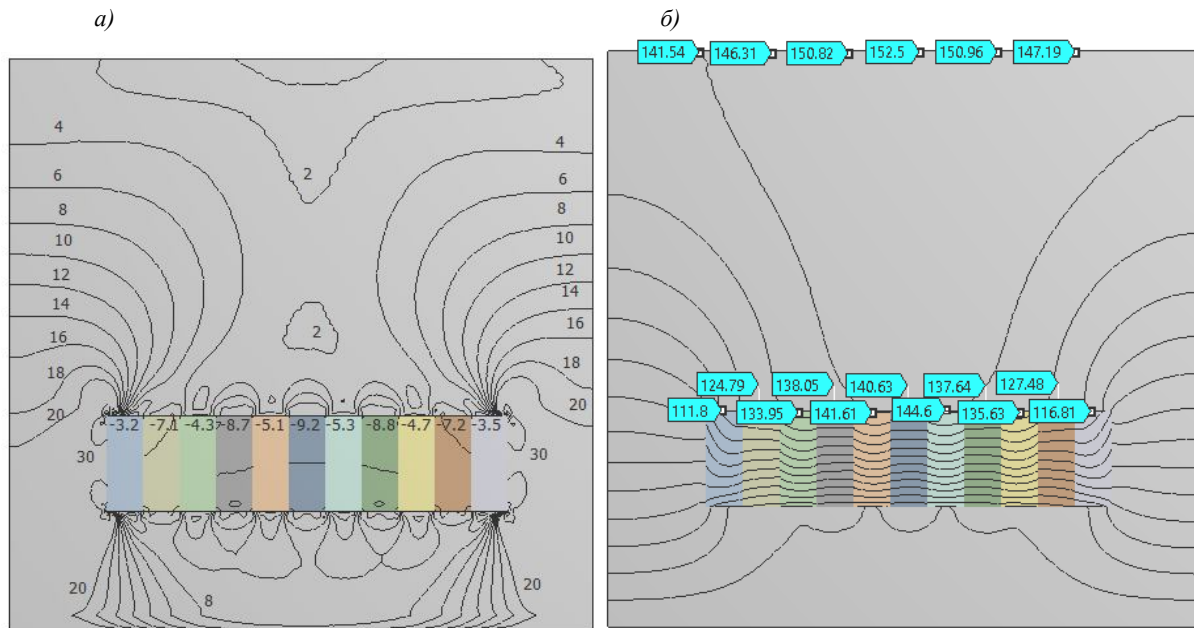
Заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами дозволяє збільшити несучу здатність штучних ціликів твердіючої закладки, оскільки створює умови об'ємного стиснення.

Крім того, утилізація пустих порід від проходки виробок в підземних виробках обумовлює позитивний екологічний ефект, захищаючи повітряне середовище басейну від додаткового джерела пилу. Крім цього, звільняються значні площі орних земель, які потенційно могли бути зайняті під відвалами.

Аналізуючи величину вертикальних деформацій денної поверхні після заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами можна звернути увагу на зниження величини вертикальних зсувів земної поверхні і стеліни відпрацьованої камери в контрольних точках над очисним простором відпрацьованих блоків. Різниця діагностованих величин коливається в межах 6–9 %.

Встановлена величина вертикальних деформацій гірського масиву при заповненні першої камери другої черги подрібненими пустими породами дозволяє встановити ключові закономірності впливу об'ємного стиснення на стійкість комбінованих штучних масивів.

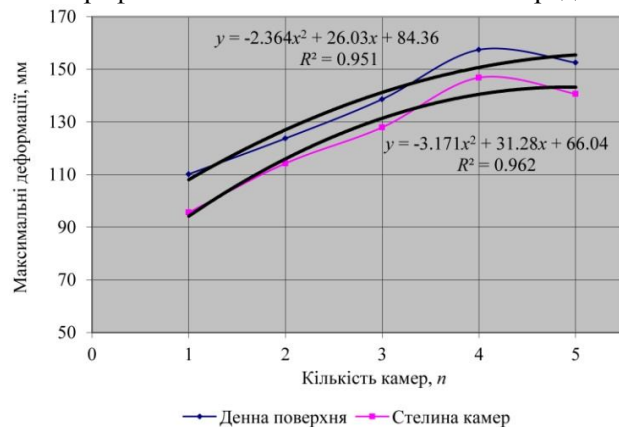
На рис. 3 представлена картина трансформації напружено-деформованого стану масиву на кінцевому етапі заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами в якості штучної закладки.



**Рис. 3.** Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) після завершального етапу заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами

Повне заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами дозволяє збільшити несучу здатність штучних ціликів твердіючої закладки камер першої черги, оскільки створює умови об'ємного стиснення для всього комбінованого закладного масиву.

Графіки встановлених залежностей представлені на рис. 4.



**Рис. 4.** Графіки залежності максимальних вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні і на контакті з стеліною відпрацьованих камер другої черги, заповнених подрібненими пустими породами

Аналіз розрахункових значень залежності величини максимальних вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованої ділянки шахтного поля і на межі з стеліною відпрацьованих камер другої черги, заповнених подрібненими пустими породами, дозволив визначити принципіві закономірності.

Вертикальні деформації структурно неоднорідного масиву залежать від кількості відпрацьованих і закладених камер другої черги. Величина вертикальних деформацій денної поверхні апроксимується поліноміальною кривою, виду

$$\epsilon = -2,364n^2 + 26,036n + 84,36, \quad (1)$$

де  $\epsilon$  – величина максимальних вертикальних зсувів денної поверхні, мм;  $n$  – кількість відпрацьованих і закладених камер другої черги.

Величина вертикальних деформацій в контрольних точках гірського масиву над очисним простором відпрацьованих і закладених камер другої черги апроксимується поліноміальною кривою, виду

$$\epsilon = -3,171n^2 + 31,289n + 66,04. \quad (2)$$

Ці залежності дозволяють визначити величину максимальних вертикальних зсувів денної поверхні і контурів стелін відпрацьованих камер другої черги при їх заповненні подрібненими пустими породами.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Встановлені кореляційні залежності дозволяють зробити висновок про вагомий вплив подрібнених пустих порід на стійкість геотехні-

чної системи «гірський масив–штучний масив комбінованої закладки» за рахунок створення умов об'ємного стиснення для всього структурно неоднорідного закладного масиву.

Так, відносно збільшення величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні при інтенсифікації відпрацювання ділянки шахтного поля з однієї до шести камер першої черги становить не більше 10–11 %. Такі величини є допустимими і не роблять істотного впливу на напружено-деформований стан структурно неоднорідного масиву.

З урахуванням стабілізації вертикальних зсувів денної поверхні внаслідок повного заповнення відпрацьованого очисного простору комбінованою закладкою величини вертикальних деформацій денної поверхні, що діагностуються, не становлять загрози.

Таким чином, закладка камер другої черги пустими породами забезпечує задовільну несучу здатність штучних ціликів твердіючої закладки камер першої черги, оскільки створює умови об'ємного стиснення для всього комбінованого закладного масиву та дозволяє утилізувати відходи гірничо-металургійних підприємств у відпрацьованому підземному просторі камер другої черги, вирішуючи одну з головних екологічних проблем Криворізького залізорудного басейну.

#### *Список літератури*

1. **М.І. Ступнік.** Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / **М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, І.О. Музика, О.В. Калініченко, М.Б. Федько, С.В. Письменний** // Розробка родовищ 2015 : щорічний наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ : Літограф, 2015. – С. 175–181.
2. **N. Stupnik.** The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine “Gigant-Gliboka” of central iron ore enrichment works (CGOK) / **N. Stupnik, V. Kalinichenko, E. Kalinichenko, I. Muzika, M. Fed'ko, S. Pis'menniy** // Metallurgical and mining industry. – 2015. –No.7. – P. 377 – 382.
3. **N. Stupnik.** The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine “Gigant-Gliboka” of central iron ore enrichment works (CGOK) / **N. Stupnik, V. Kalinichenko, E. Kalinichenko, I. Muzika, M. Fed'ko, S. Pis'menniy** // Metallurgical and mining industry. – 2015. –No.7. – P. 377–382.
4. **Калініченко О.В.** Удосконалення концепції управління напружено-деформованим станом гірського масиву при підземних гірничих роботах / **О.В. Калініченко** // **Сборник научных трудов ГП «Научно-исследовательский горнорудный институт».** – Кривой Рог. – 2015. – С. 104–111.
5. **М.І. Ступнік.** Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву покладу магнетитових кварцитів в умовах шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК» / **М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, О.В. Калініченко** // **Металлургическая и горнорудная промышленность.** – 2015. – №5. – С. 85–88.
6. **N. Stupnik.** 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. – P. 15–19.
7. **М.І. Ступнік.** Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу / **М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, О.В. Калініченко** // **Науковий вісник Національного гірничого університету.** – Дніпропетровськ. – 2012. – №6(132). – С. 126–130.
8. **Ступнік Н.И.** Проблемы мониторинга дневной поверхности в полях закрытых и действующих шахт Криворожского железорудного бассейна / **Н.И. Ступник, В.А. Калиниченко** // **Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет».** – Кривий Ріг. – 2013. – №54. – С. 17-22.
9. **Куліковська О.Є.** Стіввідношення між швидкостями сучасних рухів денної поверхні й особливостями геологічної будови Криворізького регіону / **В.В. Перегудов, О.Є. Куліковська, М.П. Сергеева** // **Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.** – Львів. – 2004. – С. 158–162.
10. **Куліковська О.Є.** Концептуальні засади маркшейдерського моніторингу безпечного функціонування гірничовидобувних регіонів : дис. ... доктора техн. наук : 05.15.01 / **О.Є. Куліковська** – Кривий Ріг, 2012. – 346 с.
11. **Панжин А.А.** Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях / **А.А. Панжин, Н.А. Панжина** // **Горный информ.-аналит. бюл.** – 2007. – №3. – С. 171–183.
12. **Сашурин А.Д.** Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий / **А.Д. Сашурин, А.А. Панжин, Ю.П. Коновалова** // **Горный информ.-аналит. бюл.** – 2003. – №7. – С. 34–38.
13. **Розробка інформатизованих систем моніторингу і керування процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні відкритих гірничих виробок і штучних підземних споруд** : Звіт з НДР, 0114U003776с. – Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ»–«НГУ», 2015. – 117 с.
14. **Денисов А.И.** Современные движения земной поверхности района Криворожья и их выраженность в рельефе / **А.И. Денисов** // **Материалы научно-технической конференции КГРИ.** – М.: ВИНТИ, 1981. – №268-81. – С. 59–69.
15. **Цариковский В.В.** Контроль процессов разрушения руд Кривбасса геофизическими методами для повышения эффективности их отработки / **В.В. Цариковский, А.Ф. Булат, В.Л. Приходченко** // **Проблемы горнодобывающей промышленности металлургического комплекса Украины.** – Кривой Рог : НИГРИ, 1998. – С. 21–24.

Рукопис подано до редакції 02.04.2019