

УДК 622.274:622.83

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
СТЕЛИН ШАТРОВОЇ ТА СКЛЕПИСТОЇ ФОРМИ**¹**Калініченко О.В., ¹Ступнік М.І.**¹*Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»***ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПОТОЛОЧИН ШАТРОВОЙ И СВОДЧАТОЙ ФОРМЫ**¹**Калиниченко Е.В., ¹Ступник Н.И.**¹*Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»***INVESTIGATION AND MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF THE TENT AND
ARCHED CROWNS**¹**Kalinchenko O. V., ¹Stupnik M. I.**¹*State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University»*

Анотація. Залізні руди Криворізького басейну видобуваються понад 130 років. У процесі їх видобутку підземним способом застосовуються різні класи систем розробки, як з обваленням руди та налягаючих порід, так і з відкритим очисним простором. У всіх випадках в гірському просторі формуються очисні або компенсаційні камери, стійкість яких в значній мірі залежить від стійкості їх стелін. Особливо проблема стійкості оголень посилилась при відпрацюванні глибоких горизонтів шахт, які характеризуються значним зростанням гірського тиску.

У роботі виконано дослідження та наведено результати моделювання напружено-деформованого стану стелін шатрової та склепистої форми. Прийняті величини гірського тиску відповідали гірничотехнічним умовам відпрацювання родовищ Криворізького басейну на глибинах понад 1200 м. Розрахунок напружень та деформацій виконано методом кінцевих елементів за допомогою програми «Ansys» версії 16.0.

В результаті виконаних досліджень встановлено, що під дією гірського тиску в стелинах спостерігається інверсія головних напружень. Формується модифікований напружено-деформований стан масиву стелін, в яких фіксується зменшення величини стискаючих напружень. Діагностується також відсутність розтягуючих напружень. Оперуючи отриманими результатами доведено, що подібні форми стелін мають пропорційно більш високу стійкість у порівнянні з класичними горизонтальними оголеннями.

Встановлено, що при відпрацюванні багатих залізних руд камерними системами розробки на значних глибинах ключовою вимогою є перехід на шатрові та склеписті форми стелін, які забезпечують максимальну стійкість в умовах високого гірського тиску.

Доведено, що інтегральний показник величини максимальних напружень у міжповерхових ціликах змінюється в межах від -10 до +32 МПа на глибинах понад 1200 м, залежить від форми стелини та знаходиться в поліноміально-логічній залежності від глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини й при склепистій формі набуває мінімальних значень, дозволяючи формувати стійкі оголення стелін очисних камер на глибинах до 2000 м.

Ключові слова: напружено-деформований стан, гірський масив, стелина, деформації, напруження.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями

Залізні руди Криворізького басейну видобуваються понад 130 років. У процесі їх видобутку підземним способом застосовуються різні класи систем розробки, як з обваленням руди та налягаючих порід, так і з відкритим очисним простором. У всіх випадках в гірському просторі формуються очисні або компенсаційні камери, стійкість яких в значній мірі залежить від стійкості їх стелін. Особливо проблема стійкості оголень посилилась при відпрацюванні глибоких горизонтів шахт, які характеризуються значним зростанням гірського тиску.

На сьогодні в Криворізькому басейні відсутні фундаментальні дослідження впливу високого гірського тиску на рівень напружено-деформованого стану масиву та стійкість оголень очисних та компенсаційних камер на горизонтах понад 1200-1400 м.

Авторами запропоновано при відпрацюванні багатих залізних руд на значних глибинах використовувати шатрові та склеписті форми стелин, які забезпечують максимальну стійкість в умовах високого гірського тиску.

Тому тема роботи, присвячена дослідженню напружено-деформованого стану масиву та стійкості стелин шатрової та склепистої форми при формуванні штучних підземних споруд є актуальною й має важливе наукове та практичне значення.

Аналіз досліджень і публікацій

Актуальність геомеханічних досліджень напружено-деформованого стану масиву при формуванні очисних та компенсаційних просторів настільки значна, що вони виконуються практично на всіх гірничих підприємствах з підземним видобутком корисних копалин. Більш того, відбуваються численні спроби узагальнити результати досліджень і представити їх у вигляді універсальних закономірностей. Однак у загальному вигляді ці дослідження мають, як правило, регіональний характер.

За результатами досліджень впливу гірського тиску на напружено-деформований стан масиву значної уваги заслуговують роботи Г.М. Малахова [1], М.І. Ступніка [2-8], О.М. Кузьменка [9], С.А. Курносова [10], А.Ф. Булата і В.В. Цариковського [11], та інших.

На сьогоднішній день шахти Криворізького басейну видобувають багаті залізні руди на глибинах 1200–1390 м, а підготовчі роботи досягли позначки 1600 м. Велика глибина розробки характеризується збільшенням гірського тиску, що суттєво впливає на напружено-деформований стан масиву та стійкість підземних виробок і очисних камер.

Одним з ефективних методів моделювання напружено-деформованого стану масиву є комп'ютерне моделювання. Комп'ютерне моделювання дозволяє 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 нами використовувався програмний комплекс «Ansys» версії 16.0.

Постановка завдання

Напружено-деформований стан масиву гірських порід є важливим фактором, що впливає на параметри застосовуваних технологій і послідовність ведення очисних робіт. Одним із основних параметрів є стійкість оголень очисних камер, особливо їх стелин.

Тому метою представленої роботи є встановлення закономірностей змін напружено-деформованого стану масиву та стійкості стелин шатрової та склепистої форми при відпрацюванні глибоких горизонтів з високим гірським тиском.

Викладення матеріалу та результати

Згідно з умовами експерименту, було сформовано моделі з шатровою і склепистою покрівлею камер, кут нахилу яких варіювався в широких межах. Прийняті величини тиску обвалених порід на рудний масив P_1 , P_2 і P_3 відповідали гірничотехнічним умовам відпрацювання родовищ Криворізького басейну на глибинах відповідно 1200, 1450 і 1700 м.

На рис. 1 представлені результати розрахунку і ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні шатрової стелі з вертикальною твірною в лежачому боці покладу.

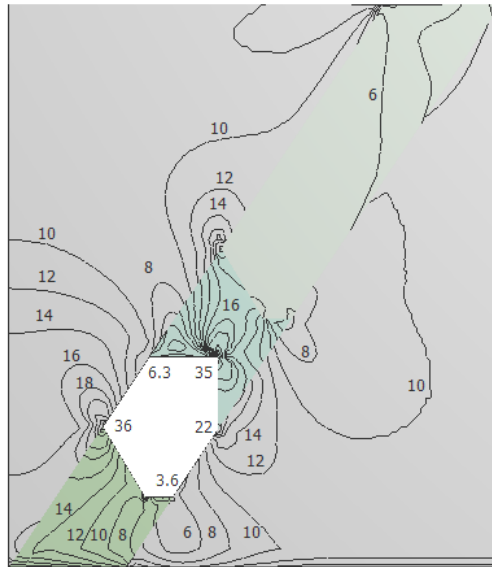


Рисунок 1 - Результати розрахунку і ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні шатрової стелі з вертикальною твірною в лежачому боці покладу: руда – 3P, порода в/б – 2П, порода л/б – 3П, тиск – P_1 ($H_p=1200$ м)

В результаті трансформації контуру стелі спостерігається інверсія головних напружень.

Формується модифікований напружено-деформований стан масиву шатрової стелі, в якій фіксується зменшення величини стискаючих напружень. Діагностується також відсутність розтягуючих напружень.

Отримані розрахункові значення залежності величини максимальних напружень в шатрових стелинах очисних камер σ_1 від глибини розробки H_p і кореспондуючої величини гірського тиску для диференційованої міцності залізних руд добре описуються логарифмічними рівняннями:

– для міцності руди $f = 4-6$

$$\sigma_1 = 28,804 \ln(H_p) - 172,05,$$

де σ_1 – величини максимальних напружень в шатрових стелинах, МПа; H_p – глибина розробки, м;

– для міцності руди $f = 5-7$

$$\sigma_1 = 28,804 \ln(H_p) - 171,05,$$

– для міцності руди $f = 6-8$

$$\sigma_1 = 25,858 \ln(H_p) - 148,3.$$

Тоді універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень в шатрових стелинах очисних камер в залежності від глибини розробки і шуканої міцності багатих залізних руд можна визначити з виразу:

$$\sigma_1 = (-0,1354f^2 + 3,0691f + 19,873) \cdot (0,9001 \ln(H_p) - 5,3766),$$

де σ_1 – універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень в шатрових стелинах, МПа; H_p – глибина розробки, м; f – міцність багатих залізних руд.

З нашої точки зору, оперуючи отриманими результатами і базовими законами гірничої механіки можна стверджувати, що подібні форми стелин мають пропорційно більш високу стійкість у порівнянні з класичними горизонтальними оголеннями.

На рис. 2 представлено результати розрахунку і ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні в очисних камерах склепоподібної стелини (потолочини).

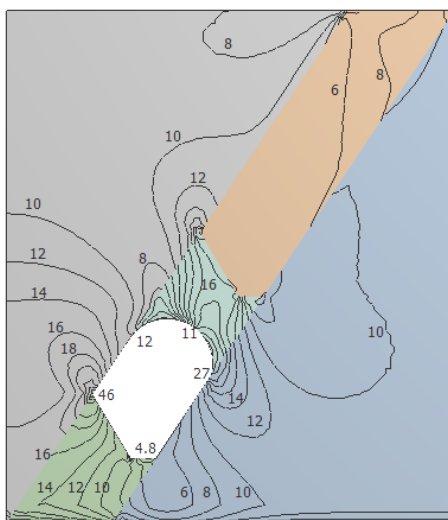


Рисунок 2 - Результати розрахунку і ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні склепоподібної стелини: руда – 3Р, порода в/б – 2П, порода л/б – 3П, тиск – P_1

Слід зазначити, що величина максимальних напружень в діагностованих стелинах варіює залежно від величини гірського тиску і кривизни склепоподібної стелини.

Найбільш стійкими є склепоподібні стелини, радіус кривизни яких ідентичний половині ширини очисної камери.

Фіксовані розрахункові значення величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах очисних камер σ_1 в залежності від глибини розробки H_p і сумарної величини гірського тиску для різної міцності залізних руд добре описуються логарифмічними рівняннями.

Залежно від міцності руд діагностовані залежності величини максимальних напружень мають вигляд:

– для міцності руди $f=4-6$:

$$\sigma_1 = 2,8804 \ln(H_p) - 10,405,$$

де σ_1 – величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах очисних камер, МПа; H_p – глибина розробки, м; – для міцності руди $f=5-7$:

$$\sigma_1 = 5,4662 \ln(H_p) - 28,635,$$

– для міцності руди $f=6-8$:

$$\sigma_1 = 5,2211 \ln(H_p) - 27,72.$$

Аналізуючи результати математичного моделювання можна стверджувати, що склепоподібна форма стелин очисних камер сприяє зниженню величини максимальних напружень. При цьому зі збільшенням радіуса кривизни склепіння спостерігається зниження величини стискуючих напружень по центру склепіння. Одночасно в п'яті склепіння діагностується збільшення максимальних напружень.

При прагненні радіусу кривизни стелини до нескінченно дискретної величини в центрі склепіння виникають напруження розтягу. В цьому випадку принципова картина розподілу напружень в масиві тотожна напружено-деформованому стану масиву горизонтальних стелин.

Залежність величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах очисних камер від відносного радіуса її кривизни визначається з виразу:

$$R_o = \frac{l_{\text{кн}}}{2R_n},$$

де R_o – відносний радіус кривизни склепіння в стелинах (потолочинах) очисних камер; $l_{\text{кн}}$ – ширина відпрацьованої камери по нормалі, м; R_n – радіус кривизни стелини, м.

Аналіз результатів математичного моделювання дозволив зробити висновок, що залежність величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах очисних камер від відносного радіуса кривизни склепіння добре описуються логарифмічним рівнянням виду:

$$\sigma_{1R_o} = 6,636 \ln(R_o) + 9,4.$$

З урахуванням радіуса кривизни стелин формули матимуть вигляд:

– для міцності руди $f=4-6$

$$\sigma_1 = (0,2880 \ln(H_p) - 1,0405) \cdot (6,636 \ln(R_o) + 9,4);$$

– для міцності руди $f=5-7$

$$\sigma_1 = (0,5466 \ln(H_p) - 2,8635) \cdot (6,636 \ln(R_o) + 9,4);$$

– для міцності руди $f=6-8$

$$\sigma_1 = (0,5777 \ln(H_p) - 2,9897) \cdot (6,636 \ln(R_o) + 9,4).$$

Синтезуючи отримані результати багатofакторних експериментів визначаємо універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах очисних камер σ_1 в залежності від глибини розробки H_p , відносного радіуса кривизни стелини R_o і диференційної міцності f залізних руд, МПа:

$$\sigma_1 = (0,2880 \ln(H_p) - 1,0405) \cdot (6,636 \ln(R_o) + 9,4) \times \\ \times (-5,83 \cdot 10^{-3} f^2 + 0,1325 f + 0,4582),$$

де σ_1 – універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень в склепоподібних стелинах, МПа; H_p – глибина розробки, м; R_o – відносний радіус кривизни склепіння; f – міцність багатих залізних руд.

Висновки

Аналізуючи результати моделювання гірського масиву та дослідження напружено-деформованого стану стелин очисних та компенсаційних камер можна зробити наступні принципові висновки.

Підвищення глибини розробки родовищ призводить до значного підвищення гірського тиску. У зв'язку з цим особливі вимоги пред'являються до стійкості оголень очисних та компенсаційних камер.

Надзвичайну увагу при проектуванні очисної виїмки на великих глибинах необхідно приділяти стійкості стелин.

У зв'язку з цим при відпрацюванні багатих залізних руд системою підповерхового обвалення ми рекомендуємо більш широке застосування на шахтах Кривбасу шатрових та склепоподібних компенсаційних камер.

При відпрацюванні багатих залізних руд камерними системами розробки ключовою вимогою є забезпечення стійкості стелин очисних камер. В цьому випадку, принципової рекомендацією є застосування склепоподібних стелин, які забезпечують максимальну стійкість в складних гірничо-геологічних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Малахов, Г.М. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений Криворожского бассейна / Г.М. Малахов. – Киев : Наукова думка, 1990. – 202 с.
2. Features of underlying levels opening at "ArcelorMittalKrivyyiRih" underground mine / N. Stupnik, V. Kalinichenko, E. Kalinichenko, S. Pismennij // Theoretical and Practical Solution of Mineral Resources Mining: CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an inform a business A BALKEMABOOK, 2015. – С. 39–45.
3. Обоснование параметров очистной камеры параболической формы при отработке железных руд в неустойчивых породах / Н.И. Ступник, В.А. Калиниченко, С.В. Письменный, Е.В. Калиниченко // Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. – Кривий Ріг, 2016. – Вип. 101. – С. 7–12.
4. Розробка та дослідження технології відпрацювання запасів блоків із застосуванням комбінованого високоефективного випуску руди / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, О.Я. Хівренко [та ін.] // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2016. – Вип. 43. – С. 3–7.

5. Удосконалення методики визначення параметрів буровибухових робіт з урахуванням напружено-деформованого стану масиву при його обваленні на похиле оголення // М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, М.Б. Федько [та ін.] / Гірничий вісник : наук.-техн. збірник. – Кривий Ріг. – 2017. – Вип. 102. – С. 47–53.

6. 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.

7. Ступнік, М.І. 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 // Metallurgicheskaya i горнорудная промышленность. – 2015. – №5. – С. 85–88.

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

9. Кузьменко, А.М. Влияние геологических нарушений на напряженное состояние вокруг выработок в массиве, ослабленном трещинами / А.М. Кузьменко, Н.Н. Уланова, В.В. Приходько // Вісник Криворізького технічного університету. – 2006. – Вип.11. – С. 196.

10. Курнос, С.А. Влияние жесткости околоштрековых полос на конвергенцию контура выемочного штрека и состояние вмещающего массива / С.А. Курнос, В.В. Задерий, В.И. Пилиugin В.И. [и др.] // «Геотехническая механика». Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вип. 121 – С. 160-171.

11. 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. –КривойРог : НИГРИ, 1998. – С. 21–24.

REFERENCES

1. Malakhov, G.M. (1990), *Upravleniye gornym davleniyem ori razrabotke rudnykh mestorozhdeniy Krivorozhskogo basseyina* [Control of mine pressure at development of ore deposits of the Krivoy Rog basin], Naukova dumka, Kiev, SU.

2. Stupnik, N., Kalinichenko, V., Kalinichenko, Ye. and Pismenny, S. (2015), «Features of underlying levels opening at "ArcelorMittalKryvyiRih" underground mine», *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, pp. 39–45.

3. Stupnik, N.I., Kalinichenko, V.A., Pismenny, S.V. and Kalinichenko, Ye.V. (2016), «Ground parameters of cleansing chamber of parabolic form at working out iron ores in unsteady rocks», *Gimnychy visnyk*, Vol. 101, pp. 7–12.

4. Stupnik, M.I., Kalinichenko, V.O., Khivrenko, O.Ya. [and others] (2016), «Development and research technology of working out the reserves of blocks with use of the combined high-effectively ore drawing», *Visnyk Kryvorizkogo Natsionalnogo Universytetu*, Vol. 43, pp. 3–7.

5. Stupnik M.I., Kalinichenko, V.O., Fedko, M.B. [and others] (2017), «Improvement method of determination parameters of drilling and blasting works taking into account the tensely-deformed state of massif at his bringing down on the sloping baring», *Gimnychy visnyk*, Vol. 102, pp. 47–53.

6. Kalinichenko, Ye.V. (2015), «Improvement conception of control by the tensely-deformed state of mine massif at underground mining works», *Sbornik nauchnykh trudov GP «Nauchno-issledovatel'skiy gornorudnyy institut»*, Vol. 110, pp. 104–111.

7. Stupnik, N.I., Kalinichenko, V.O. and Kalinichenko, Ye.V. (2015), «Research of the tensely-deformed state of mine massif of quartzites magnetites bed in the conditions of the mine «Gigant-Glubokaya» PAS «TsGZK», *Metallurgical and mining industry*, no. 5, pp. 85–88.

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

9. Kuzmenko, A.V., Ulanova, N.N. and Prykhodko, V.V. (2006), «Influence of geological violations on the tense state round working in the massif, weakened by cracks», *Visnyk Kryvorizkogo Tekhnichnogo Universytetu*, Vol. 11, p. 196.

10. Kurnosov, S.A., Zaderiy, V.V., Pilyugin, V.I. [and others] (2015), «Influence of inflexibilities of around-drift strihs on convergence of contour of extracting drift and state of containing massif», *Geo-Technical Mechanics*, Vol. 121, pp. 160-171.

11. Tsarykovsky, V.V., Bulat, A.F. and Prykhodchenko, V.L. (1998), «Monitoring processes of destruction of Krivbass ores for the increase of efficiency of their working out», *Problems of mining industry of metallurgical complex of Ukraine*, no. 25, pp. 21–24.

Про авторів

Калініченко Олена Всеволоодівна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна, elenakalinichenko_v@mail.ru

Ступнік Микола Іванович, доктор технічних наук, професор, ректор, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет" (ДВНЗ «КНУ»), Кривий Ріг, Україна

About the authors

Kalinichenko Olena Vsevolodivna, Candidate of Economics, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University» (SHEI «KNU»), Kryvyi Rih, Ukraine, elenakolesnichenko_v@mail.ru

Stupnik Mykola Ivanovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Rector, State Higher Educational Institution «Kryvyi Rih National University» (SHEI «KNU»), Kryvyi Rih, Ukraine

Аннотация. Железные руды Криворожского бассейна добываются свыше 130 лет. В процессе их добычи подземным способом применяются разные классы систем разработки, как с обрушением руды и вмещающих пород, так и с открытым очистным пространством. Во всех случаях в горном пространстве формируются очистные или компенсационные камеры, устойчивость которых в значительной степени зависит от устойчивости их кровли. Особенно проблема устойчивости обнажений усилилась при отработке глубоких горизонтов шахт, характеризующихся значительным ростом горного давления.

В работе выполнены исследования и приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния потолочин шатровой и сводчатой формы. Принятые величины горного давления отвечали горнотехническим условиям отработки месторождений Криворожского бассейна на глубинах свыше 1200 м. Расчет напряжений и деформаций выполнен методом конечных элементов по программе «Ansys» версии 16.0.

В результате выполненных исследований установлено, что под действием горного давления в потолочинах наблюдается инверсия главных напряжений. Формируется модифицированное напряженно-деформированное состояние массива потолочин, в которых фиксируется уменьшение величины сжимающих напряжений. Диагностируется также отсутствие растягивающих напряжений. Опираясь на полученные результаты, доказано, что подобные формы потолочин имеют пропорционально более высокую стойкость в сравнении с классическими горизонтальными обнажениями.

Установлено, что при отработке богатых железных руд камерными системами разработки на значительных глубинах ключевым требованием является переход на шатровые и сводчатые формы потолочин, обеспечивающие максимальную стойкость в условиях высокого горного давления.

Доказано, что интегральный показатель величины максимальных напряжений в междуэтажных целиках изменяется в границах от -10 к + 32 МПа на глубинах свыше 1200 м зависит от формы потолочины и находится в полином-логарифмической зависимости от глубины разработки, прочности железных руд, угла наклона, относительного радиуса кривизны потолочины и при сводчатой форме получает минимальные значения, позволяя формировать стойкие обнажения потолочин очистных камер на глубинах до 2000 м.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, горный массив, потолочина, деформации, напряжения.

Annotation. The iron-stones of the Kryvoy Rog field are obtained over 130 years. In the process of their booty by an underground method different classes of the systems of exploitation are used both with bringing down of ore and containing breeds and with the opened cleansing space. In all case in mine space forms cleansing or compensative chambers, stability of which largely depends on stability of their roof. Especially the problem of stability of baring increased at working off deep horizons of the mines characterized by considerable growth of mine pressure.

The paper studies and presents results of modeling of stress-strain state of the tent and arched crowns. The accepted values of rock pressure corresponded to mining and technical conditions of Kryvbas deposits at the depths of over 1200 m. Calculation of stresses and strains was performed by finite element method on the basis of Ansys 16.0.

Results of the research demonstrate that under influence of rock pressure crowns inversion of principal stresses occurs. The modified stress-strain state with decreased compressive stresses is formed in the crown massif; absence of tension stresses is diagnosed. The obtained results prove that such types of crown shapes are proportionally more stable in comparison with classical horizontal exposures.

The research reveals that in order to provide maximum stability under high rock pressure at mining rich iron ores by the room-and-pillar systems at great depths the key requirement is transition to the tent and arched shapes of crowns.

It is proved that integrated index of maximum stresses in the floor pillars varies from -10 MPa to + 32 MPa at depths over 1200 m, depends on the crown shape and is in the polynomial dependence on the mining depth, iron ore hardness, slope angle and relative radius of the crown curvature. With the tent-shaped crowns, the index gains its minimal values allowing stable exposures of stope crowns at the depths of up to 2000 m.

Key words: stress-strain state, rock massif, crown, strains, stresses.

Стаття надійшла до редакції 16.03.2018.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.А. Курносовим.