

М.І. СТУПНІК, д-р техн. наук, проф., М.Б. ФЕДЬКО, канд. техн. наук, доц.,
М.А. ГРИЩЕНКО, ст. викладач, О.В. КАЛІНІЧЕНКО, д-р техн. наук, гол. наук. співроб.,
В.О. КАЛІНІЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ФОРМИ КОМПЕНСАЦІЙНИХ КАМЕР НА ЇХ СТІЙКІСТЬ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ЯКІСТЬ ВИДОБУТОЇ РУДНОЇ МАСИ

Метою статті є теоретичне обґрунтування оптимальних форм і розмірів компенсаційних камер, визначення їх стійкості та впливу на якість видобутої рудної маси. Україна посідає провідне місце у світі з видобутку залізорудної сировини. Переважна частина багатих залізних руд видобувається підземним способом. Встановлено, що зі збільшенням глибини розробки продуктивність шахт падає, погіршується якість видобутої рудної маси. Причиною цього є погіршення гірничо-геологічних умов відпрацювання родовищ. Видобуток багатих залізних руд характеризується значними втратами та засміченням руди досягаючи, в окремих випадках, відповідно 14-20% і 12-18%. Дані показники втрат є наслідком того, що видобуток ведеться застарілою технікою і технологіями. В роботі досліджені та запропоновані удосконалені форми компенсаційних камер, які дозволяють збільшити об'єм компенсаційного простору, видобути більшу кількість чистої руди та підвищити якість видобутої сировини

Методи дослідження. Функціональний аналіз вимог світової металургійної промисловості до якості залізних руд підземного видобутку на шахтах України. Моделювання гірського масиву методом кінцевих елементів (МКЕ) з використанням спеціалізованої комп'ютерної програми Ansis 2021-P2.

Наукова новизна. Встановлені нові залежності впливу форми компенсаційних камер на їх стійкість, технологічні параметри та якість видобутої рудної маси.

Практична значимість. Застосування компенсаційних камер високої стійкості дасть можливість збільшити їх об'єм, що дозволить підвищити кількість вилученої чистої руди, зменшити її засмічення та досягти зростання якості видобутої рудної маси, що матиме позитивний вплив на підвищення її ціни та конкурентоспроможність товарної продукції.

Результати. Доведено, що найвищу стійкість має вертикальна компенсаційна камера трапецієвидної форми, яка буде стійкою у діапазоні усіх розглянутих глибин (1400-2000 м) навіть у рудах невисокої міцності та стійкості. Дещо меншу стійкість мають вертикальні компенсаційні камери та камери склепистої форми, де вивали різної інтенсивності будуть мати місце в нижній частині оголень у рудах низької міцності на глибинах понад 1750 м

Ключові слова: залізна руда, підземна розробка, компенсаційні камери, напружено-деформований стан, стійкість, якість.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-3-8

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями На сьогоднішній день Україна володіє одними з найбільших у світі запасів залізних руд [1, 2]. Багаті залізні руди відпрацьовують підземним способом. Основною проблемою підземної розробки родовищ є зниження якості видобутої сировини зі зниженням глибини розробки [6, 7, 12].

Встановлено, що повнота вилучення відбитої руди та зниження її якості є факторами, які суттєво впливають на економічні результати підземної розробки. Відомо, що на сьогодні відпрацювання залізорудних родовищ підземним способом в Кривбасі здійснюється з втратами і засміченням руди на рівні, відповідно, 14-20% і 12-18%. Внаслідок цього втрачається до 20% залізорудної сировини, зосередженої в надрах [7, 12].

Такі високі показники втрат і засмічення руди зумовлені в значній мірі застарілою технікою та технологією гірничих робіт. Технології розробки, які дозволяють максимально знизити рівень втрат та засмічення відбитої руди характеризуються підвищеною собівартістю і застосовуються лише в особливо складних гірничотехнічних умовах та при видобутку руд більшої цінності.

Отже, досягнення максимальної ефективності підземної розробки може бути забезпечене за рахунок встановлення оптимального співвідношення між показниками вилучення руди і величиною допустимих витрат при її видобутку.

Встановлено, що підвищення якості видобутої руди можна досягти за рахунок збільшення об'єму компенсаційних камер, що можливе лише за умови забезпечення їх стійкості. Це дозволить збільшити кількість вилученої чистої руди з них, зменшити засмічення руди та досягти зростання якості видобутої рудної маси. Всі ці заходи матимуть позитивний вплив на підвищення ціни та конкурентоспроможність товарної продукції.

Аналіз досліджень і публікацій. Як відомо, компенсаційні камери застосовують при виконанні систем розробки з обваленням руди і вміщуючих порід для забезпечення компенсації збільшення об'єму руди при її масовому обваленні [3,4].

Такі системи, як відомо, застосовують на шахтах в умовах недостатньої міцності та стійкості руди та вміщуючих порід. Відпрацювання залізородних покладів в Кривбасі здійснюють в основному в інтервалі глибин 1200-1400 м з подальшим поглибленням до 1800 – 2000 м. Таким чином, в умовах негативного прояву гірського тиску на глибоких горизонтах постає питання вибору найбільш раціональної форми компенсаційних камер [12–14].

Встановлено, що форма компенсаційних камер суттєво впливає на напружено-деформований стан (НДС) гірського масиву, а відповідно й на стійкість оголень та компенсаційних камер у цілому [4,12–14]. Тому дослідження напружено деформованого стану масиву вкрай важливі як на стадії проектування, так і в процесі розробки родовищ.

На практиці застосовують оперативну оцінку величини діючих напружень в масиві та прогнозують характер їх зміни при утворенні компенсаційних камер [5,8]. Дана інформація дозволяє оцінити вихідні дані для вдосконалення і розробки нових форм компенсаційних просторів, здійснити вибір оптимальних параметрів компенсаційних камер і визначити раціональну технологію їх утворення [9–11].

Постановка задачі. Отже, метою представленої роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування оптимальних форм і розмірів компенсаційних камер, визначення їх стійкості та впливу на якість видобутої рудної маси.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі:

виконано аналіз досліджень і публікацій згідно теми досліджень;

обґрунтовано методи досліджень;

представлені результати досліджень та зроблені відповідні висновки.

Основна ідея представленої роботи полягає у пошуку такої оптимальної форми компенсаційних просторів, яка б давала можливість уникнути утворення зон критичних стискуючих напружень та знизити можливість руйнування оголень компенсаційних камер. Необхідно також уникати виникнення зон розтягуючих напружень, які є небезпечними з огляду на те, що межа міцності гірських порід на розтягування є на порядок меншою від межі їх міцності на стискання.

В представленій роботі для моделювання гірського масиву був використаний метод кінцевих елементів (МКЕ) з використанням спеціалізованої комп'ютерної програми Ansis 2021-P2.

Згідно з умовами досліджень, представлених в статті, були опрацьовані моделі з наступними формами компенсаційних камер: вертикальною, трапецієвидною та склепистою. Для коректного порівняння розміри компенсаційних камер різної форми були однаковими.

Для кожної форми компенсаційної камери були розроблені кінцево-елементні моделі, які відповідають реальним формам компенсаційних просторів. Розмір кінцевих елементів становить 2 м.

Для дослідження впливу міцності руди на напружено-деформований стан масиву і стійкість камер в моделі закладали 3 типи руд: міцністю 3 - 5 (середня 4), 4 - 6 (середня 5) та 5 - 7 (середня 6) балів за шкалою проф. М.М. Протода'яконова.

Основні фізико-механічні властивості руди та обвалених порід приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості руди і обвалених порід

Параметри	Один. виміру	Руда			Обвалені породи
		1Р (f=3-5)	2Р (f=4-6)	3Р (f=5-7)	
Модуль Юнга	МПа	22000	25000	28000	5000
Питома вага	кг/м ³	3700	3650	3600	2300
Межа міцності на стискання	МПа	30	40	50	4
Межа міцності на розтягнення	МПа	3	4	5	0.2
Коефіцієнт Пуассона		0.30	0.28	0.26	0.24

Величини тиску обвалених порід на рудний масив P_1 , P_2 і P_3 відповідають гірничотехнічним умовам відпрацювання родовищ Кривбасу на глибині, відповідно, 1400, 1750 і 2000 м і приведені у табл. 2.

Тиск обвалених порід на гірський масив при комп'ютерному моделюванні

Параметр	Один. виміру	P1	P2	P3
Тиск обвалених порід на масив вертикальний/бічний	МПа	8,2/29	9,7/3,4	11,5/4

Моделювання було реалізовано на комп'ютері HP 250 з процесором Intel I5-1135G7, ОЗП 16 ГБ з операційною системою Windows 10 pro x64.

Викладення матеріалу та результати. При визначенні об'єму компенсаційної камери необхідно враховувати кількість та коефіцієнт розпушення руди при її масовому обваленні. Враховуючи те, що компенсаційна камера знаходиться в рудному масиві і не контактує з пустими породами, доцільно збільшити об'єм компенсації для збільшення кількості вилученої чистої руди. Збільшуючи питому вагу високоякісної чистої руди, яка буде вилучена з компенсаційної камери при її утворенні, ми підвищуємо якість видобутої рудної маси у цілому по блоку (панелі).

На сьогоднішній день шахти Кривбасу застосовують класичні форми компенсаційних камер: горизонтальну, вертикальну та похилу. Багато науково-технічних розробок було присвячено пошуку інших, більш досконалих форм. Серед останніх можна відзначити трапецієвидну, шатрову, траншейну, склеписту та інші форми. Основна ідея таких пошуків полягає у визначенні такої форми, яка б давала можливість уникнути утворення зон надвисоких стискуючих напружень, які, як правило, концентруються навколо кутових зон камер. Крім того, форма камер повинна знижувати вірогідність утворення зон розтягуючих напружень, які є небезпечними з огляду на те, що межа міцності більшості залізних руд практично на порядок менша від межі їх міцності на стискання.

Відповідно до цього авторами запропоновано декілька оригінальних варіантів форм компенсаційних камер, для яких були проведені дослідження їх стійкості за допомогою комп'ютерного моделювання. До порівняння обрано стандартний варіант вертикальної компенсаційної камери, який є найбільш стійким серед класичних варіантів.

Серед запропонованих авторами варіантів досліджено варіанти з трапецієвидною та склепистою формою компенсаційних камер.

На рис. 1 представлені результати моделювання та ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери у рудах різної міцності (P1, P2 і P3).

Розподіл поля напружень є характерним для камер такої форми: зони концентрації високих стискуючих напружень зосереджені у кутах камери, а зони понижених стискуючих напружень розташовані у центральній частині покрівлі та вертикальних оголень камери.

З рисунків видно, що на однаковій глибині величини напружень при різній міцності руди практично не відрізняються поміж собою. Водночас спостерігається суттєвий вплив глибини робіт на НДС масиву. Але рівень максимальних стискуючих напружень є на 15-20% меншим, ніж для аналогічних умов (однакової міцності руди та глибини робіт) горизонтальної компенсаційної камери, що свідчить про вищу стійкість вертикальної компенсаційної камери. Лише на глибині 1750 м при міцності руди 3-5 балів у верхніх кутах камери можуть бути невеликі вивали, а на глибині 2000 м обсяги вивалів призведуть до руйнування стелі над камерою та її заповнення налягаючими обваленими породами. У рудах більшої міцності камери будуть стійкими у всьому діапазоні розглянутих глибин.

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні вертикальної компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 21,399e^{0,1537H_p};$$

$$R^2 = 0,9997.$$

де σ_1 – величина максимальних головних напружень; H_p – глибина розробки родовища, м; R^2 – величина достовірності апроксимації.

На рис. 2 представлені результати моделювання та ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери у рудах різної міцності.

На рис. 2 ми бачимо практично аналогічний характер розподілу ізоліній, але значно менший (на 25-30% у порівнянні з попереднім варіантом) рівень максимальних стискуючих напружень. Ці напруження мають місце у найбільш проблематичних верхніх кутах вертикальної

трапецієвидної компенсаційної камери, що можливо пояснити значно меншим прогоном покрівлі камери. Внаслідок цього компенсаційні камери такої форми будуть стійкими на всіх розглянутих глибинах навіть у рудах мінімальної (3-5 балів) міцності.

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні трапецієвидної компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 18,739e^{0,013H_p};$$

$$R^2 = 0,9877.$$

Дещо меншу стійкість у порівнянні з цим варіантом, але кращу у порівнянні з вертикальною прямокутною, має вертикальна склеписта камера (рис. 3), де рівень максимальних стискуючих напружень займає проміжне значення.

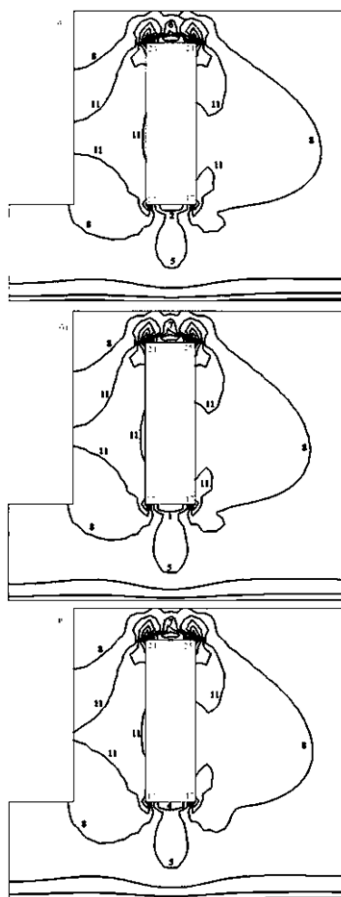


Рис. 1. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

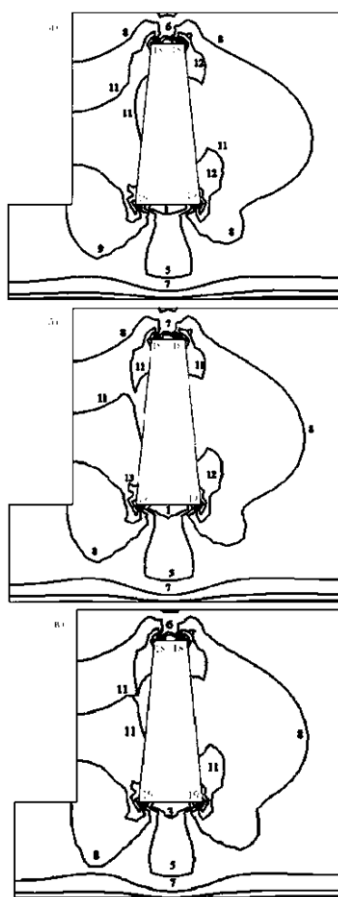


Рис. 2. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної трапецієвидної компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

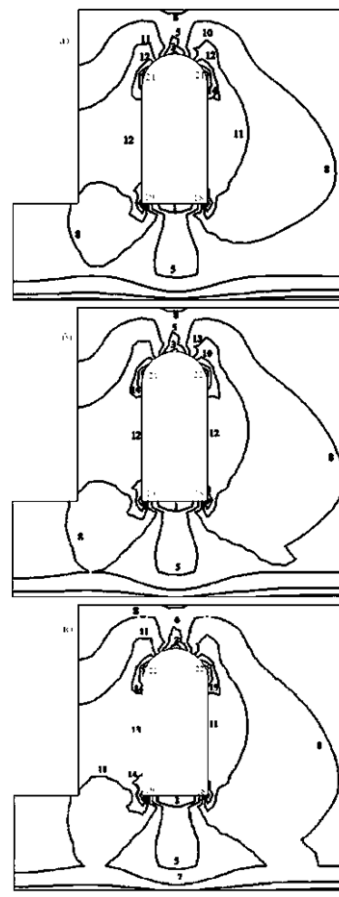


Рис. 3. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної склепистої компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні склепистої компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 18,667e^{0,165H_p};$$

$$R^2 = 0,9998.$$

Це можна пояснити, з одного боку, відсутністю у верхній частині камери кутових зон, з іншого – більшим, у порівнянні з трапецієвидною камерою, прогоном її покрівлі. Внаслідок цього лише при мінімальній розглянутій міцності руди на глибині 2000 м у п'ятах склепіння можливі відносно невеликі вивали, які не несуть загрози її руйнування.

При більшій міцності руди камери такої форми також будуть стійкими на глибині до 2000 м включно.

Висновки та напрямок подальших досліджень. На підставі виконаного моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву навколо компенсаційних камер різної форми та його впливу на їх стійкість можна зробити наступні висновки:

рівень напружено-деформованого стану рудного масиву навколо компенсаційних камер при невеликій різниці у міцності руди головним чином залежить від глибини робіт, а на їх стійкість впливатиме величина напружень у конкретних умовах та фізико-механічні властивості руди, що напряму залежать від її міцності;

найвищу стійкість у порівнянні з усіма іншими має вертикальна компенсаційна камера трапецієвидної форми, яка буде стійкою у діапазоні усіх розглянутих глибин навіть у рудах міцністю 3-5 балів;

меншу стійкість мають вертикальна компенсаційна камера склепистої форми, де незначні вивали будуть у п'ятах склепіння камери в рудах міцністю 3-5 балів на глибині 2000 м;

дещо поступається вищезазначеним стандартна вертикальна компенсаційна камера прямокутної форми, де проблеми зі стійкістю будуть у рудах міцністю 3-5 балів на глибині 2000 м;

з огляду на виконані дослідження та практичний досвід роботи шахт Кривбасу, які здійснюють видобування багатих залізних руд, доцільно, на наш погляд, більш широке застосування запропонованих форм компенсаційних камер, зокрема вертикальної трапецієвидної та склепистої форми;

застосування компенсаційних камер високої стійкості дає можливість збільшити їх об'єм навіть в рудах нижче середньої стійкості, що дозволить збільшити кількість вилученої чистої руди, зменшити її засмічення та відповідно досягти зростання якості видобутої рудної маси, що матиме позитивний вплив на підвищення її ціни та конкурентоспроможності товарної продукції на світовому ринку залізничної сировини.

Список літератури

1. Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин України та проблеми надрокористування (20 років ДКЗ): зб. наук. праць / За ред. Г.І. Рудько. Київ–Чернівці: Букрек, 2013. 308 с.
2. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>.
3. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Музика І.О., Калініченко О.В. [та ін.]. Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / Розробка родовищ: щорічний наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: Літограф, 2015. С. 175–181.
4. Stupnik, M., Kalinichenko, V., Kalinichenko, O., Muzyka, I., Fedko, M., Pysmennyi, S. Information technologies as a component of monitoring and control of stress-deformed state of rock mass / Mining of Mineral Deposits, 2015. 9(2). P.175-181. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.175>.
5. Сашурин А.Д., Беликов В.Е. Проблемы устойчивости подземных и наземных сооружений в зоне тектонических нарушений / Вопросы осушения, горнопромышленной геологии и охраны недр: Материалы международного симпозиума. Белгород: ВИОГЕМ, 2003. С. 206–216.
6. Балута А.М., Борисенко В.Г. Прогнозная оценка физико-механических свойств горных пород Кривбасса. К.: Наукова думка, 1972. 88 с.
7. Скляр Л.В. Повышение качества бедных кусковых руд шахтной добычи Кривбасса методом отсадки/ Скляр Л.В., Николаенко К.В., Олейник Т.А. // Качество минерального сырья.- Кривой Рог:Минерал.-2005.-С.87-89.6. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. М. : Недра, 1978. 256 с.
8. Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Филиппова А.А. Изучение проявлений горного давления на моделях. М. : Углетехиздат, 1959. 283 с.
9. Кирпичев М.В. Теория подобия. М. : Академия Наук СССР, 1953. 95 с.
10. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Л. : Изд. ВНИМИ, 1976. 83 с.
11. Глушихин Ф.П. Моделирование в геомеханике. М. : Недра, 1991. 240 с.
12. Калініченко О.В. Розвиток наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву при формуванні підземних виробок: дис... докт. техн. наук: 05.15.02 / Калініченко О.В. – Дніпро, 2020. 405 с.
13. Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Fedko M.B., Kalinichenko O.V. Investigation into crown stability at underground leaching of uranium ore / Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ, 2018. № 6. С.20-25. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-6/5>.
14. Stupnik N., Kalinichenko V., Kalinichenko E., Muzika I., Fed'ko M., Pis'menniy S. 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) / Metallurgical and mining industry, 2015. No.7. P.377-383. http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_7/060Stupn/.