

Національна академія наук України  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

КАЛІНІЧЕНКО ОЛЕНА ВСЕВОЛОДІВНА



УДК 622.272:622.646.(043.5)

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ УПРАВЛІННЯ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ МАСИВУ ПРИ ФОРМУВАННІ  
ПІДЗЕМНИХ ВИРОБОК**

05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Криворізькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Ступнік Микола Іванович,**  
Криворізький національний університет  
Міністерства освіти і науки України, ректор.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Маланчук Зіновій Романович,**  
Національний університет водного господарства  
та природокористування (м. Рівне), професор кафедри  
розробки родовищ корисних копалин;  
доктор технічних наук, професор  
**Четверик Михайло Сергійович,**  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
НАН України (м. Дніпро), завідувач відділу  
геомеханічних основ технологій відкритої  
розробки родовищ;  
доктор технічних наук, доцент  
**Сахно Іван Георгійович,**  
Донецький національний технічний університет  
(м. Покровськ), професор кафедри розробки  
родовищ корисних копалин.

Захист відбудеться «2» травня 2020 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вулиця Сімферопольська, 2-а, Дніпро, 49005, тел. (056) 746-01-51.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вулиця Сімферопольська, 2-а, Дніпро, Дніпропетровська область, 49005.

Автореферат розісланий «1» вересня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д 08.188.01,  
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У Криворізькому залізорудному басейні протягом десятків років складалася несприятлива ситуація зі збереженням денної поверхні в межах діючих, закритих та ліквідованих шахт.

У результаті тривалої та інтенсивної експлуатації родовищ Кривбасу підземним способом утворилися значні площі підпрацьованих гірничими роботами територій. Порушення денної поверхні з воронками, провалами й зонами обвалення були викликані застосуванням на підземних гірничих роботах, при відпрацюванні верхніх горизонтів, різних варіантів систем розробки з обваленням руди та вміщуючих порід, а також камерних систем розробки.

У першому випадку, при м'яких нестійких рудах, спостерігалися досить плавні просідання денної поверхні з формуванням прогнозованих зон обвалення.

При використанні камерних систем розробки формування зон обвалення відбувалося стрибкоподібно, залежно від обсягу камерного виймання, міцності рудної стелини та вміщуючих порід. У цьому випадку прогнозування зон обвалення було та є більш складним завданням, оскільки необхідно враховувати фізико-механічні властивості гірських порід, які мають більш високу міцність. У зв'язку з цим, при обваленні покрівлі камер можлива неповна посадка стелин, що, своєю чергою, може призвести до формування міні-камер, облік і контроль яких практично неможливий. Посадка таких міні-камер, розташованих поруч із денною поверхнею (наприклад, умови розробки родовища колишнього рудоуправління (РУ) ім. Ілліча), може призвести до незапланованих провалів денної поверхні через багато років після відпрацювання покладів і повного закриття шахт.

Доволі складну в прогнозуванні ситуацію представляють сьогодні відпрацьовані сліпі поклади, розташовані на верхніх горизонтах. Ці поклади, які мають, як правило, невеликі розміри відносно основних рудних тіл, відпрацьовувалися за спеціальними проектами. З огляду на їх невеликі розміри й відокремленість від основного покладу, не можна з повною впевненістю стверджувати, що відносно них було виконано всі необхідні заходи щодо повного погашення (або закладення) відпрацьованих камер. Отже, такі можливі пустоти також можуть становити потенційну небезпеку для денної поверхні.

Крім цього, підземна розробка магнетитових кварцитів на вищерозташованих горизонтах шахт за технологією «камера-цілик» призвела до формування в надрах величезної кількості пустот, що обчислюються мільйонами кубічних метрів. Ці пустоти становлять потенційну небезпеку в разі їх обвалення.

На сьогодні в Криворізькому басейні відсутні фундаментальні дослідження з питань впливу технології підземної розробки багатих залізних руд і магнетитових кварцитів на стійкість денної поверхні. Відсутні стратегічні дослідження проблеми впровадження технологій із закладенням виробленого

простору, що дозволяють здійснювати підземний видобуток залізних руд зі збереженням денної поверхні та наявних містобудівних структур.

Отже, розвиток наукових основ управління процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні підземних гірничих виробок, встановлення закономірностей деформацій денної поверхні залежно від глибини розробки, кута падіння покладу, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, форми стелини очисних камер та структури штучного цілика, обґрунтування параметрів та розробка технологій відпрацювання рудних покладів, які запобігають утворенню провалів земної поверхні при підземному видобутку руд, є **актуальною науково-технічною проблемою**, яка має важливе наукове та практичне значення для підвищення ефективності та безпеки підземного видобутку руд.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року, затвердженої Законом України від 21 квітня 2011 року № 3268-VI. Вона відповідає тематиці науково-дослідних робіт Криворізького національного університету: «Геомеханічне і технологічне обґрунтування розкриття, підготовки, відпрацювання складноструктурних покладів корисних копалин, у тому числі на значних глибинах (1500-2000 м)» (№ ДР 0109U002336); «Обґрунтування та розроблення високоефективних технологій буровибухових робіт в умовах високого гірського тиску з використанням безтритилових вибухових речовин» (№ ДР 0013U004002); «Розробка інформатизованих систем моніторингу і керування процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні відкритих гірничих виробок і штучних підземних споруд» (№ ДР 0114U003776); «Дослідження стану гірничого масиву в зоні впливу очисних робіт, розробка алгоритму розрахунку безпечних та стійких параметрів очисних блоків на шахтах ДП «СхідГЗК» (за договором № 636/02 від 11.07.2019 р.); «Визначення закономірностей трансформації напружено-деформованого стану порушеного виробками гірського масиву з метою створення ресурсозберігаючих технологій видобутку руд» (№ ДР 0117U001969), у яких автор брав участь як виконавець.

### **Мета і завдання дослідження.**

*Мета* дисертаційної роботи – розвиток наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву за рахунок уточнення закономірностей взаємодії полів напружень при формуванні підземних гірничих виробок для підвищення ефективності та безпеки підземного видобутку руд.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішувалися такі основні завдання:

1. Дослідити напружено-деформований стан масиву в міжповерхових і міжкамерних ціликах на глибинах понад 1200 м та визначити величину максимальних напружень та деформацій залежно від форми стелин, глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу й відносного радіуса кривизни стелин в умовах шахт Кривбасу.

2. Визначити закономірності впливу гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов відпрацювання покладів уранових руд на шахтах ДП «СхідГЗК» на несучу здатність ціликів та стійкість технологічних оголень.

3. Установити закономірності деформації денної поверхні при камерному вийманні магнетитових кварцитів залежно від глибини розробки, кількості відпрацьованих горизонтів, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, а також структури штучних ціликів.

4. Установити закономірності зміни величини втрат руди в гребенях відпрацьованих блоків другої черги на контакті із закладеним масивом камер першої черги залежно від кута нахилу бічних поверхонь трапецеїдальної основи штучних ціликів і висоти відпрацьованих камер.

5. Обґрунтувати шляхи застосування інформаційних технологій для побудови систем моніторингу та управління напружено-деформованим станом гірських порід при видобутку руд підземним способом.

6. Обґрунтувати параметри, розробити та впровадити високоефективні та безпечні технології підземної розробки рудних покладів, що дозволяють зберігати земну поверхню та утилізувати відходи гірничого виробництва у виробленому просторі шахт.

*Ідея роботи* полягає у використанні закономірностей трансформації геомеханічних полів напружень при підземному відпрацюванні рудних покладів, у тому числі із закладенням виробленого простору для обґрунтування параметрів новітніх технологій, що дозволяють керувати напружено-деформованим станом масиву, зберігати непорушеною земну поверхню та утилізувати відходи гірничого виробництва у виробленому просторі шахт.

*Об'єкт дослідження* – процеси взаємодії різномодульних середовищ при відпрацюванні рудних покладів камерними системами розробки.

*Предмет дослідження* – параметри технології підземного видобутку рудних родовищ, у тому числі із закладенням виробленого простору, та закономірності зміни напружено-деформованого стану масиву, які визначають умови їх застосування.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети в роботі було використано комплексний метод досліджень, який включає аналіз та узагальнення літературних джерел в області геомеханічних досліджень; теорію планування експерименту та фізичне моделювання напружено-деформованого стану масиву на моделях з еквівалентних матеріалів; аналітичний апарат теорії пружності для розрахунку величини максимальних напружень у міжповерхових ціликах; метод кінцевих елементів для визначення величини деформації денної поверхні при камерному вийманні рудних покладів; імітаційне моделювання випуску руди з очисних блоків; дослідно-промислово перевірку результатів дисертаційної роботи та їх упровадження у виробництво.

*Обґрунтованість і достовірність* положень, висновків і рекомендацій підтверджені використанням апробованих методів механіки гірських порід, адекватністю розроблених математичних моделей реальним об'єктам і процесам гірничого виробництва, дослідженням сипучого середовища при моделюванні випуску руди з блоків, коректним узгодженням результатів

аналітичних досліджень із даними лабораторних дослідів і натурних спостережень (похибка не перевищує 10–15 %), результатами практичного використання розробок і рекомендацій в умовах шахт Криворізького басейну та ДП «СхідГЗК».

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*Наукові положення, які виносяться на захист:*

1. 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 й знаходиться в поліноміально-логарифмічній залежності від глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини та при її склепистій формі набуває мінімальних значень, дозволяючи формувати стійкі оголення стелин очисних камер на глибинах до 2000 м.

2. При відпрацюванні бідних урановмісних руд із застосуванням технології підземного блокового вибуговування спареними по висоті блоками товщина тимчасового міжповерхового цілика-стелини визначається з урахуванням коефіцієнта зменшення міцності стелини від дії на неї кислотного розчину  $K_{кр}$ , який визначається як відношення межі міцності уранових руд, які зазнали дії кислотного розчину, до межі міцності вихідних зразків, які не мали такого впливу, і змінюється за поліноміальною залежністю від 0,66 до 0,6 при технологічному терміні дії на уранові руди кислотного розчину від 2 до 6 місяців.

3. Величина деформації денної поверхні при камерному вийманні магнетитових кварцитів з закладкою знижується на 55–95 % і знаходиться в поліноміальній залежності від глибини розробки, кількості відпрацьованих горизонтів, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, а також структури штучного цілика, каркасно-модульна будова якого забезпечує зниження величини деформації на 75–80 % при скороченні собівартості закладних робіт на 43–54 %.

4. Втрати руди в гребенях відпрацьованих блоків другої черги на контакті зі штучним масивом закладених камер першої черги експоненційно залежать від висоти відпрацьованих блоків, поліноміально від кута нахилу бічних поверхонь трапецеїдальної основи штучних ціликів і при формуванні кутів нахилу, адекватних твірній воронки випуску, знижуються до величин 0,7–1,2 %, дозволяючи збільшити видобування руди з блока на 4,1–7,8 %.

*Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:*

– уперше встановлено закономірності варіації величини вертикальних деформацій гірського масиву та максимальних вертикальних зсувів денної поверхні від фізико-механічних властивостей гірських порід і стану очисних камер при підземному відпрацюванні магнетитових кварцитів камерними системами розробки;

– уперше одержано залежності універсального інтегрального показника величини максимальних напружень у горизонтальних, шатрових, склепистих і похилих стелинах очисних камер від глибини розробки (до 2000 м), кута нахилу, кривизни стелини, а також міцності залізних руд;

– уперше визначено закономірності впливу кута падіння рудного покладу, товщини стелини та ступеня її порушеності гірничими виробками на несучу здатність і стійкість стелин та визначено залежність впливу коефіцієнта зменшення міцності стелини  $K_{кр}$  від дії на неї кислотного розчину при використанні технології підземного блокового вилуговування уранових руд із відпрацюванням спарених по висоті блоків;

– уперше встановлено залежність несучої здатності комбінованого закладного масиву камер з каркасом твердіючої закладки та породним модулем від товщини його каркаса;

– уперше встановлено кількісні залежності втрат руди в гребенях на контакті з твердіючим закладним масивом блоків першої черги після випуску руди з камер другої черги від висоти відпрацьованої камери й кута нахилу бічних поверхонь трапецеїдальної основи штучних ціликів при формуванні днища блока з похилими бічними поверхнями нижньої частини камер першої черги;

– дістали подальший розвиток теоретичні основи площинного пошарового випуску відбитої руди з «мертвої зони» лежачого боку рудних покладів з недостатніми кутами падіння при формуванні похилого обмежуючого контакту відбитої руди з очисним забоєм.

*Наукове значення роботи* полягає в розвитку наукових основ управління процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні підземних гірничих виробок, установленні закономірностей деформацій денної поверхні залежно від глибини розробки, кута падіння покладу, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, форми стелини очисних камер та структури штучного цілика, що дозволяє обґрунтувати параметри та розробити ефективні й безпечні технології відпрацювання рудних покладів, які запобігають утворенню провалів земної поверхні при підземному видобутку руд.

#### **Практичне значення роботи.**

1. Розроблено методику розрахунку величини максимальних напружень у міжповерхових ціликах на глибинах понад 1200 м залежно від форми стелин, глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини.

2. Розроблено методичні рекомендації «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» для умов шахт ПрАТ «Євраз Суха Балка».

3. Розроблено методичні рекомендації «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» для умов родовища шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком».

4. Розроблено методику розрахунку величини деформації денної поверхні при камерному вийманні магнетитових кварцитів залежно від глибини розробки, кількості відпрацьованих горизонтів і фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, а також структури штучних закладних масивів.

5. Розроблено методику проведення експериментально-промислових досліджень стійкості елементів очисних камер на шахтах ДП «СхідГЗК».

6. Розроблено «Інструкцію з визначення безпечних та стійких параметрів очисних блоків на шахтах ДП «СхідГЗК».

7. Розроблено методику розрахунку стійкості стелин при використанні технології підземного блокового вилуговування уранових руд із відпрацюванням спарених по висоті блоків.

8. Розроблено методику розрахунку втрат руди в гребенях на контакті з твердіючим закладним масивом камер першої черги після випуску обваленої руди з блоків другої черги.

9. Розроблено методику визначення оптимальних параметрів технології відпрацювання рудних покладів з урахуванням мінімізації втрат руди в гребенях і збільшення показників видобування відбитої руди з блоків другої черги.

10. Розроблено технологію площинного пошарового випуску відбитої руди з «мертвої зони» лежачого боку рудних покладів з недостатніми кутами падіння при формуванні похилого обмежуючого контакту відбитої руди з очисним забоєм.

11. Розроблено технологічні схеми комбінованого «каркасно-модульного» закладення камер із каркасом твердіючої закладки та породним модулем усередині сформованої структури для умов шахт Криворізького басейну.

12. Розроблено Стандарт підприємства (СТП) «Методика расчета удельных норм расхода основных материальных ресурсов подземного горнодобывающего комплекса ГП «ВостГОК» та Стандарт підприємства (СТП) «Нормы расхода основных материалов на ведение горных работ в условиях шахтоуправления по подземной добыче руды (на правах шахт) горного департамента ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

**Реалізація роботи.** Результати дисертаційної роботи використано:

– у проектах на відпрацювання запасів залізорудної сировини на шахтах Криворізького залізорудного басейну (Акт використання результатів дисертаційної роботи ДП ДПІ «Кривбаспроект» від 15.05.2019 р.);

– у технологіях формування шатрових стелин компенсаційних камер при видобутку залізних руд на глибоких горизонтах шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» на підставі методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в умовах родовища шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» (Затверджено 26.03.2017 р.);

– у технологіях формування склепистих стелин при видобутку залізних руд на значних глибинах на підставі методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» на шахтах ПрАТ «Євраз Суха Балка» (Акт упровадження від 21.09.2017 р.).

Річний очікуваний економічний ефект від упровадження у виробництво технологічних рішень, розроблених у дисертаційній роботі, складе на



гірничодобувних підприємствах Криворізького басейну 1314,714 тис. грн, зокрема по шахті «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» – 975,0 тис. грн при річному видобутку 1,5 млн т; по шахтах ПрАТ «Євраз Суха Балка» – 339,714 тис. грн при річному видобутку 528,5 тис. т залізної руди («Розрахунки економічної ефективності...» від 26.03.2017 р. та 21.09.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні наукової проблеми, мети, ідеї, задач досліджень, наукових положень, новизни й висновків; у встановленні закономірностей зміни напружено-деформованого стану масиву, особливо при формуванні підземних гірничих виробок в умовах високого гірського тиску на глибоких горизонтах рудних шахт, установленні закономірностей деформацій денної поверхні залежно від глибини розробки, кута падіння покладу, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, форми стелени очисних і компенсаційних камер, структури штучного цілика, що дозволяє обґрунтувати параметри та розробити високоєфективні, безпечні технології відпрацювання рудних покладів, які запобігають утворенню провалів земної поверхні при підземному видобутку руд. Зміст дисертації викладено автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (ДВНЗ «Криворізький національний університет», травень 2011–2016 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки» (Москва-Будапешт-Відень, 27 березня 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку сучасної науки» (м. Київ, 24–25 червня 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки» (м. Київ, 19–20 листопада 2015 р.); Міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» (м. Кривий Ріг, ДВНЗ «КНУ», 14 грудня 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 24–26 травня 2017 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Школа підземної розробки» (м. Дніпропетровськ, НГУ, 2018 р.); Международной научно-технической конференции (71-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). Минск, БНТУ, 2018 р.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 53 наукові роботи, у тому числі 41 публікація у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, у закордонних та фахових виданнях України, 5 патентів, 7 – у матеріалах конференцій.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертація складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків і списку використаних джерел із 317 найменувань на 41 сторінці, містить 299 сторінок машинописного тексту, 18 таблиць та 85 рисунків, з яких 18 – на окремих сторінках, а також 11 додатків на 47 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан сировинної бази Кривбасу, а також шляхи розв'язання проблеми збереження денної поверхні в полях відпрацьованих, законсервованих і діючих шахт Криворізького басейну.

Аналіз наведених даних показує, що при підземному видобуванні з надр корисних копалин змінюється напружено-деформований стан гірських порід. А це, своєю чергою, впливає на процеси зрушення гірських масивів, при яких зміщення можуть досягати верхніх горизонтів і проявлятися у вигляді деформацій земної поверхні. Такі зміщення можуть призводити до руйнування промислових і цивільних об'єктів, розташованих у цій зоні.

Проблемі зрушення гірських порід і земної поверхні присвячено роботи багатьох вітчизняних і закордонних учених та фахівців наукових центрів України: Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Криворізького національного університету, Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Донецького національного технічного університету, ДВНЗ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Інституту фізики гірничих процесів НАН України, Українського науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи НАН України; близького зарубіжжя – наукові, учбові центри РФ і Республіки Казахстан тощо; далекого зарубіжжя – країни Європейської Співки, США, Канади, Австралії, Китаю, Південної Кореї та інших наукових центрів.

Актуальність геомеханічних досліджень настільки значна, що вони виконуються практично на всіх гірничих підприємствах з підземним видобутком корисних копалин. Більш того, відбувалися численні спроби узагальнити результати досліджень і представити їх у вигляді універсальних закономірностей. Однак, у загальному вигляді ці дослідження мали, зазвичай, регіональний характер.

Проблема збереження денної поверхні в полях відпрацьованих, законсервованих і діючих шахт Криворізького басейну виникла практично одночасно з початком підземної розробки залізних руд у Кривбасі. У результаті тривалої та інтенсивної експлуатації залізрудних родовищ Криворізького басейну підземним способом утворилися значні пустоти, які негативним чином впливали на збереження денної поверхні.

На сьогодні площа підпрацьованих підземними гірничими роботами територій у Криворізькому басейні за оцінюванням Державного проектного інституту «Кривбаспроект» становить 3600 га, зокрема площа воронок обвалення в межах мульди зрушення гірських порід у полях діючих і ліквідованих шахт становить близько 1030 га. Дані території мають тенденцію до розширення через продовження видобутку залізних руд підземним способом.

У той же час практика й накопичений досвід роботи гірничодобувних підприємств показують, що на сьогодні витрати на реалізацію заходів щодо

попередження можливих надзвичайних ситуацій були б значно нижчими, ніж витрати на їх ліквідацію в майбутньому. На наш погляд, єдиним ефективним способом, що гарантує неможливість провалів і просідань денної поверхні в межах шахтних полів Кривбасу, є впровадження на шахтах басейну систем розробки із закладенням виробленого простору. При незначному підвищенні собівартості видобутку такі системи розробки дозволять одержати економію в майбутньому, забезпечивши збереження денної поверхні й безпеку Криворізького басейну.

Однак, на сьогодні в Криворізькому басейні відсутні фундаментальні дослідження з проблем впливу технології підземної розробки багатих залізних руд і магнетитових кварцитів на рівень напружено-деформованого стану масиву та стійкість денної поверхні. Відсутні стратегічні дослідження проблеми впровадження технологій із закладенням виробленого простору, що дозволяють здійснювати підземний видобуток залізних руд зі збереженням стійкого стану гірського масиву, непорушеної денної поверхні та наявних містобудівних структур. Тому тема дисертаційного дослідження, присвячена розвитку наукових основ моніторингу й управління процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні підземних виробок, дослідженню й розробленню технологічних рішень, що запобігають утворенню провалів земної поверхні при підземному видобутку руд, є актуальною й має важливе наукове та практичне значення.

У **другому розділі** запропоновано комплексну методику дослідження геотехнічних і технологічних завдань, яка забезпечує обґрунтовану перевірку результатів теоретичних, експериментальних та практичних досліджень і гарантує високу достовірність одержаних результатів.

Чисельні методи моделювання, що враховують фізико-механічні властивості неоднорідних гірських масивів, вимагають значних потужностей для розв'язання завдань високої обчислювальної складності. Цей факт обумовлює ефективність застосування сучасної комп'ютерної техніки для розв'язання завдань дослідження, моніторингу та прогнозування напружено-деформованого стану гірського масиву при видобутку залізної руди підземним способом.

Для побудови епюр напружень і деформацій методом кінцевих елементів над моделлю було проведено триангуляцію (розбиття 3D-моделі на трикутники) з розміром сторони 2–3 м.

З метою встановлення закономірностей зміни напружень і деформацій у контрольних точках очисних камер, а також фіксування просідань денної поверхні було виконано комплекс експериментів з визначення цих величин залежно від фізико-механічних властивостей гірського масиву й закладного матеріалу. Установлено параметри лінії тренду й визначено рівняння для знаходження величини напружень і деформацій гірського масиву залежно від модуля пружної деформації гірських порід і стану очисних камер.

Визначено достовірність апроксимації для діагностованих кривих.

На рис. 1 представлено графіки залежності величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні в контрольних точках масиву.

Для лабораторних досліджень деформацій і напруженого стану масиву використовувались еквівалентні матеріали: кварцовий пісок, мелений граніт, чавун і парафін. Моделювання виконувалося на плоско-поворотному стенді розміром  $5000 \times 5000 \times 500$  мм. Для коректного порівняння результатів проведених експериментальних досліджень з результатами математичного моделювання параметри ділянки родовища приймалися адекватними математичній моделі.

Моделювання випуску обваленої руди з блока виконано на статичних моделях випуску. Як еквівалентний матеріал, що моделює обвалену руду, використовувалася відповідна до масштабу моделювання фракція мартизової руди.

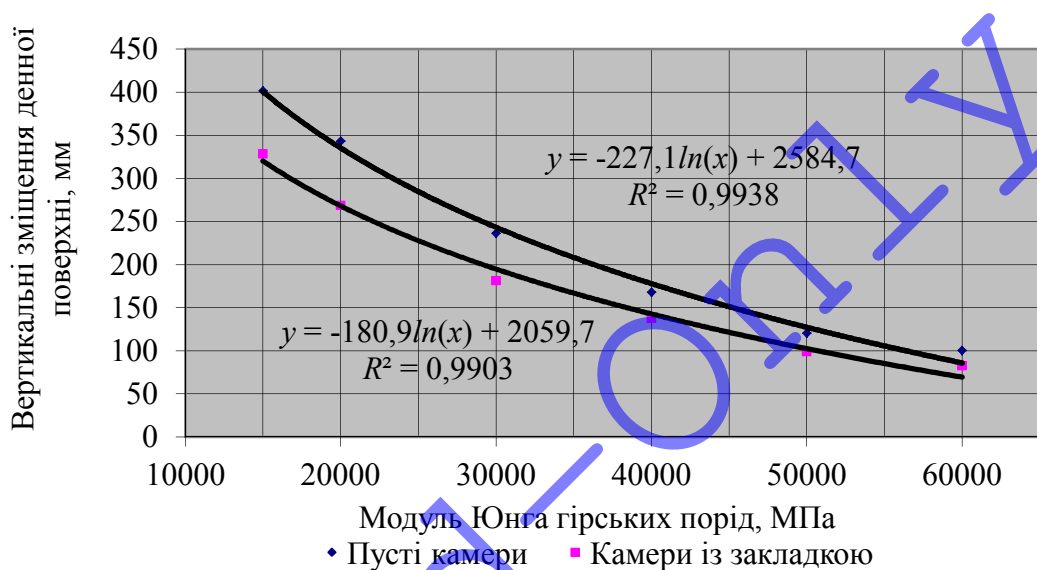


Рисунок 1 – Графіки залежності величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні в контрольних точках гірського масиву при різних фізико-механічних властивостях гірських порід

Для моделювання масиву твердіючої закладки використовувався відповідний еквівалентний матеріал, приготування якого здійснювалося в лабораторії кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин Криворізького національного університету.

Для приготування еквівалентних складів використовувалися зневоднені шлами збагачувальних фабрик Криворізького басейну в суміші з технічним парафіном. Зазначений еквівалентний матеріал є пружно-пластичним і за своїми фізико-механічними властивостями аналогічний модельованому масиву.

Оброблення результатів моделювання здійснювалося методами математичної статистики. Для визначення точності одержаних результатів розраховувалися відповідні коефіцієнти варіації.

Розрахунок напружено-деформованого стану масиву чисельними методами дозволив одержати значення величини напружень і деформацій у контрольних точках комбінованого масиву.

У **третьому розділі** виконано дослідження напружено-деформованого стану масиву гірських порід у полях діючих шахт Кривбасу. Для одержання необхідних чисельних значень процес дослідження напружено-деформованого стану було розбито на етапи, прив'язані до технологічних циклів відпрацювання покладів. Така методика досліджень одержала назву методу «послідовних циклів». Технологічні цикли розглядалися як процес перерозподілення напружень між гірським масивом, закладкою й обваленими пустими породами, при цьому навантаження в кожному наступному етапному циклі визначалося з урахуванням попереднього технологічного циклу.

Запропоновано універсальну методику розрахунку технологічних циклів при відпрацюванні шахтних полів наявними технологіями. Основною умовою діагностики адекватних результатів є облік технології трансформації гірського масиву. З цією метою розглянуто технології формування очисних камер I, II ... n черг відпрацювання з наступним закладенням камер як твердіючою закладкою, так і іншими закладними сумішами, включаючи пусті породи від проходки виробок, хвости збагачення та інші відходи гірничодобувних підприємств.

У цьому випадку розв'язання завдання визначення напружено-деформованого стану масиву після проведення  $n$ -го технологічного циклу може бути представлено такими математичними залежностями:

$$\begin{aligned} \sigma_n(\varepsilon(\sigma_{n-1})t_n) &= \sigma_0 + \sigma_T(\varepsilon(\sigma_0)t_T) + \sigma_{IIзакл} k_{ДКА}^3 k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{II})t_{IIзакл}) + \\ & \sigma_{T2} k_{ДКА}^{2M} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{II})t_{II}) + \sigma_{T3} k_{ДКА}^{2n} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{III})t_{III}) + \dots + \sigma_{T_{n-1}} k_{ДКА}^{2M} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{n-1})t_{n-1}) \quad (1) \\ e_n(\varepsilon(\sigma_{n-1})t_n) &= e_0 + e_T(\varepsilon(\sigma_0)t_T) + e_{IIзакл} k_{ДКА}^3 k_{ев}(\varepsilon(\sigma_I)t_{IIзакл}) \\ & + e_{T2} k_{ДКА}^{2M} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{II})t_{II}) + e_{T3} k_{ДКА}^{2n} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{III})t_{III}) + \dots + e_{T_{n-1}} k_{ДКА}^{2M} k_{ев}(\varepsilon(\sigma_{n-1})t_{n-1}) \end{aligned}$$

при  $t_0 + t_T + t_{IIзакл} + t_{II} + \dots + t_{n-2} \leq t_n \leq t_0 + t_T + t_{IIзакл} + t_{II} + t_{III} + \dots + t_{n-1}$ ,

де  $\sigma(\varepsilon(\sigma)t)$ ,  $e(\varepsilon(\sigma)t)$  – відповідно характеристики напружень і деформацій комбінованого масиву;  $\sigma_{0,I,II,III,n}$  і  $t_{0,I,II,III,n}$  – відповідно параметри навантаження й часу, характерні для відповідного розрахункового (технологічного) циклу відпрацювання та закладення камер;  $k_{ДКА}^3$ ,  $k_{ДКА}^{2M}$  – коефіцієнт дискретно-континуальної анізотропії відповідно закладки та гірського масиву;  $k_{ев}$  – компоненти одиничного вектора, нормального до поверхні оголення очисної камери.

Для оцінювання впливу підземних гірничих робіт на напружено-деформований стан гірського масиву та стан денної поверхні в Криворізькому басейні, а також установлення можливостей комп'ютерного моделювання складних геомеханічних процесів у гірському масиві було виконано дослідження ділянки гірничого відведення колишнього РУ ім. Дзержинського.

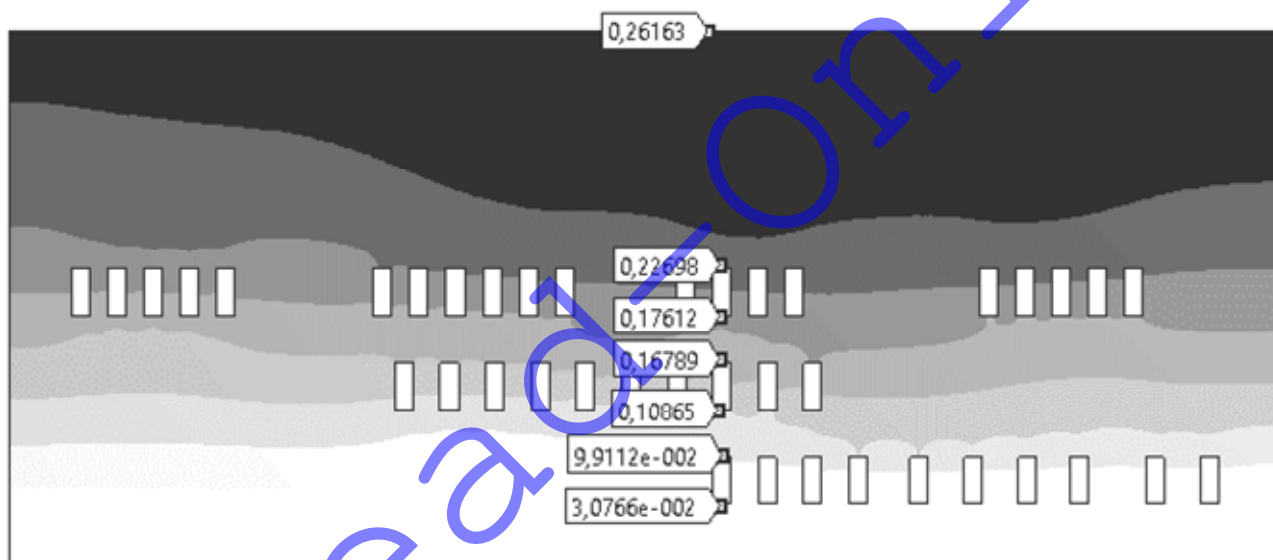
Відпрацювання магнетитових кварцитів здійснювалося за технологією «камера-цілик». Очисний простір камер першої черги планувалося заповнювати твердіючою закладкою. Надалі передбачалося відпрацювання камер другої

черги (ціликів) із подальшим їх закладенням комбінованими закладними сумішами. У зв'язку з ліквідацією шахти «Гігант-Глибока» та РУ ім. Дзержинського загалом, відпрацьовані камери з відкритим очисним простором законсервовані та є доволі проблемною геоструктурою.

Для визначення фундаментальних закономірностей і встановлення ключових залежностей трансформації напружено-деформованого стану масиву було проведено базові дослідження ділянки шахтного поля шахти «Гігант-Глибока» завдовжки за простяганням понад 2,1 км і завглибшки за падінням до 900 м. Розрахунок напружень і деформацій здійснювався методом кінцевих елементів на базі програмного комплексу Ansys 16.0.

Моделювання виконано для двох випадків: у першому всі відпрацьовані камери тривалого консервування пустують (як це є насправді), а в другому – усі камери заповнені твердіючою закладкою.

Як видно з рис. 2, максимальний рівень вертикальних деформацій при трансформації відпрацьованих камер з відкритим очисним простором має місце на денній поверхні та становить близько 262 мм.



Рисуюнок 2 – Розрахункові епюри деформації з числовими значеннями зсувів (м) у контрольних точках гірського масиву з відпрацьованими пустими камерами першої черги тривалого консервування

Одержані значення «просідання» денної поверхні над місцями ведення підземних гірничих робіт добре узгоджуються з результатами інструментальних спостережень за вертикальними зміщеннями, які виконанала в нашому регіоні Куликовська О.Є. За її даними, деформації земної поверхні в Криворізькому басейні на найбільш небезпечних ділянках досягають величин до 275 мм, а відносна швидкість осідання поверхні може досягати 8–10 мм/рік.

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 із 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.

Установлений рівень «просідання» денної поверхні є достатньо великим, оскільки на поверхні в цьому районі знаходиться інтенсивна житлова забудова й різні об'єкти міської інфраструктури (зокрема дороги), які не допускають порушення денної поверхні.

Крім того, у надрах гірничого відведення знаходяться величезні запаси досить високоякісних магнетитових кварцитів, які можуть стати об'єктом подальшого видобутку. У такому випадку баланс даної літосистеми буде порушуватися, а збільшення обсягів незаповнених пустот (відпрацьованих камер) може становити потенційну загрозу.

Моделювання такої ситуації дозволяє визначати відповідну величину трансформацій денної поверхні.

Корелюючи детерміновані значення деформацій масиву з камерами, заповненими твердіючою закладкою, визначаємо ключові закономірності трансформації комбінованого масиву. Величина деформації становить близько 118 мм, що в 2,2 разу менше, ніж деформації денної поверхні за наявності відпрацьованих камер із відкритим очисним простором.

Одержані розрахункові значення залежності величини вертикальних деформацій гірського масиву  $\varepsilon_6$  (мм) від глибини розташування відпрацьованих камер із відкритим очисним простором добре апроксимуються поліноміальною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon_6 = -0,0002H^2 + 0,0262H + 118,19, \quad (2)$$

де  $H$  – глибина розташування відпрацьованих камер із відкритим очисним простором, м.

Аналогічна залежність величини вертикальних деформацій гірського масиву  $\varepsilon_3$  (мм) від глибини розташування відпрацьованих камер, заповнених твердіючою закладкою, добре апроксимується поліноміальною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon_3 = -0,0004H^2 + 0,0468H + 262,5. \quad (3)$$

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. 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 стелін.

Згідно з умовами експерименту, було сформовано моделі з горизонтальною, шатровою, склепистою й похилою 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.

Результати розрахунку й ізолінії максимальних напружень  $\sigma_1$  гірського масиву при формуванні горизонтальної та шатрової стелін представлено на рис. 3.

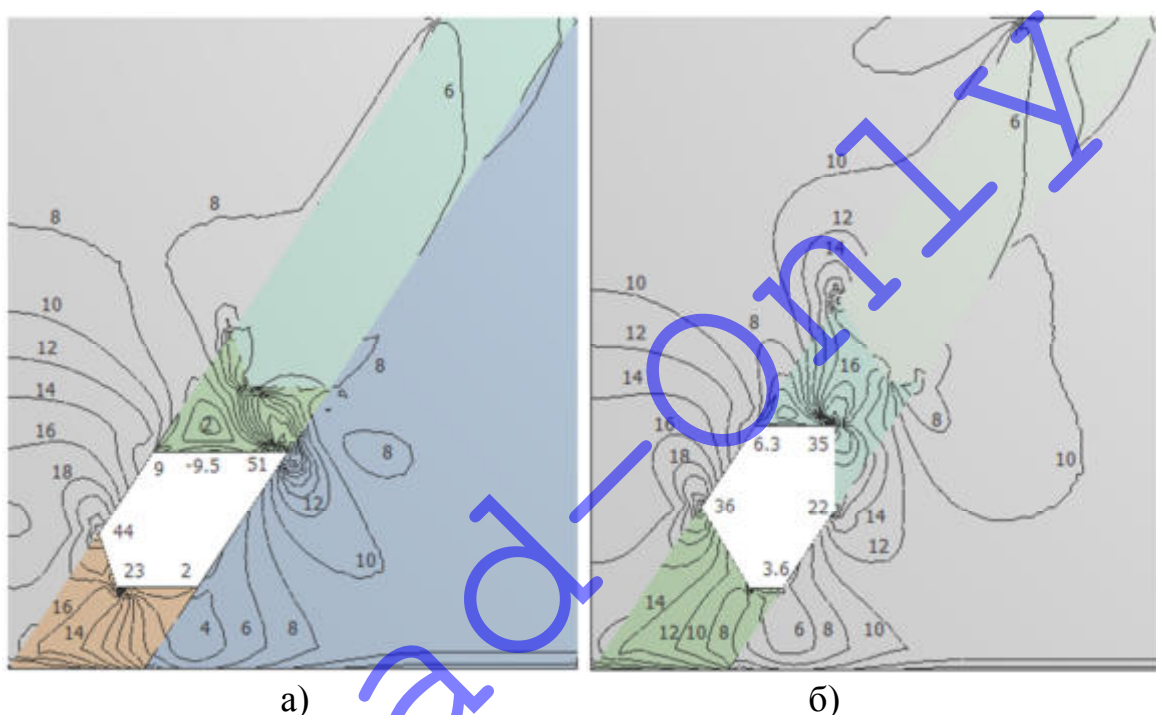


Рисунок 3 – Розрахункові ізолінії головних напружень  $\sigma_1$  гірського масиву при формуванні горизонтальної (а) й шатрової (б) стелін:  $f=5-7$ ;  $H_p=1200$  м

Одержані розрахункові значення характеризуються універсальним інтегральним показником величини максимальних напружень у горизонтальних стелинах очисних камер  $\sigma_{1z}$  (МПа) залежно від глибини розробки й диференційованої міцності залізних руд, який визначається з виразу:

$$\sigma_{1z} = (-4,4394 \ln(f) - 1,6208) \cdot (2,2727 \cdot 10^{-7} H_p^2 - 1,4545 \cdot 10^{-3} H_p + 0,3472), \quad (4)$$

де  $H_p$  – тут і в подальшому глибина розробки, м;  $f$  – міцність залізних руд за шкалою професора М.М. Протодьяконова.

Універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень у шатрових стелинах очисних камер  $\sigma_{1ш}$  (МПа) можна визначити з виразу:



$$\sigma_{1u} = (-0,1354f^2 + 3,0691f + 19,873) \cdot (0,9001 \ln(H_p) - 5,3766). \quad (5)$$

Оперуючи одержаними результатами й базовими законами гірничої механіки, можна стверджувати, що шатрові форми стелин мають більш високу стійкість відносно класичних горизонтальних оголень.

На рис. 4 представлено залежності величини максимальних напружень у горизонтальних стелинах очисних камер від глибини розробки й величини гірського тиску для диференційованої міцності залізних руд.

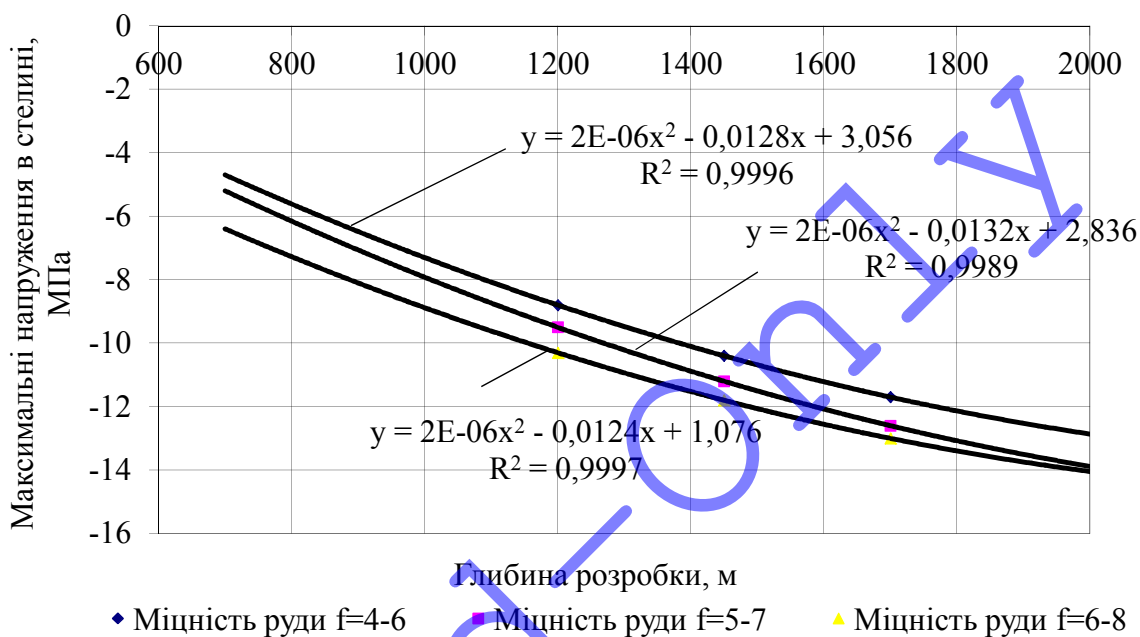


Рисунок 4 – Залежності величини максимальних напружень у горизонтальних стелинах очисних камер від глибини розробки й міцності залізних руд

На рис. 5 представлено результати розрахунку й ізолінії максимальних напружень  $\sigma_1$  гірського масиву при формуванні склепистої та похилої стелин.

Слід зазначити, що величина максимальних напружень у діагностованих стелинах варіює залежно від величини гірського тиску та кривизни склепистої стелини. Найбільш стійкими є склепоподібні стелини, радіус кривизни яких ідентичний половині ширини очисної камери. При цьому зі збільшенням радіуса кривизни склепіння спостерігається зниження величини стискуючих напружень по центру стелини. Одночасно в п'яті склепіння діагностується збільшення максимальних напружень.

При прагненні радіуса кривизни стелини до нескінченно дискретної величини в центрі склепіння виникають розтягуючі напруження. У цьому випадку принципова картина розподілення напружень у масиві тотожна напружено-деформованому стану масиву горизонтальних стелин.

Узагальнюючи результати багатofакторних експериментів, визначаємо універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень у склепистих стелинах очисних камер  $\sigma_{1c}$  (МПа) залежно від глибини розробки,

відносного радіуса кривизни стелини й диференційованої міцності залізних руд:

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

Універсальний інтегральний показник величини максимальних напружень у похилих стелинах очисних камер  $\sigma_{1n}$  (МПа) визначається:

$$\sigma_{1n} = (1,0469 \ln(H_p) - 6,3746) \cdot (-0,0031 \lambda_n^2 + 0,5517 \lambda_n - 9,1692) \times (0,2566 \ln(f) + 0,5836) \quad (7)$$

де  $\lambda_n$  – кут нахилу похилої стелини, град.

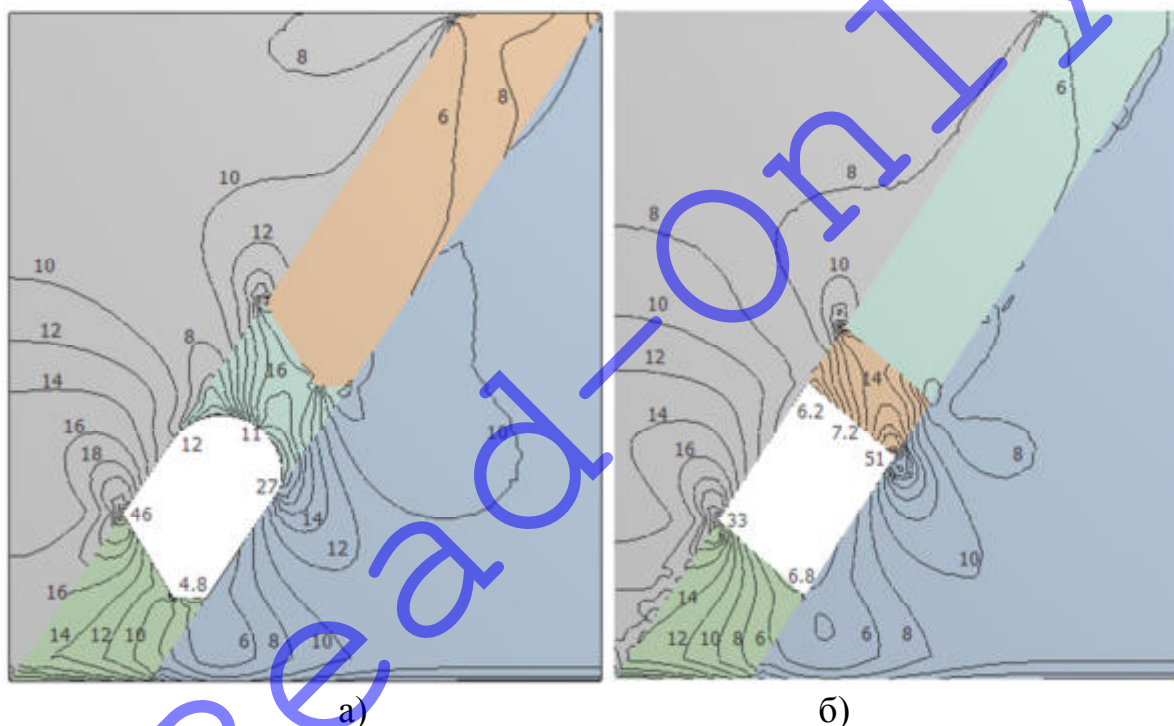


Рисунок 5 – Розрахункові ізолінії головних напружень  $\sigma_1$  гірського масиву при формуванні склепистої (а) й похилої (б) стелин:  $f=5-7$ ;  $H_p=1200$  м

Аналізуючи результати моделювання, можна зробити такі висновки.

При відпрацюванні багатих залізних руд на великих глибинах системами підповерхового обвалення необхідно використовувати вертикальні й похилі компенсаційні камери. При відпрацюванні глибоких горизонтів камерними системами розробки ключовою вимогою є перехід на шатрові та склеписті стелини, 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-

логарифмічній залежності від глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини й при її склепистій формі набуває мінімальних значень, дозволяючи формувати стійкі оголення стелин очисних камер на глибинах до 2000 м.

Виконано дослідження напружено-деформованого стану масиву гірських порід у полях діючих шахт ДП «СхідГЗК». Розроблено методику визначення безпечних та стійких параметрів очисних блоків. Виконані розрахунки стійкості оголень у відпрацьованих камерах з урахуванням фактичного часу їх існування показали, що отримані параметри повністю відповідають фактичній стійкості камер у блоках усіх шахт. Розроблена методика забезпечує високу точність при визначенні проектних параметрів камер в очисних блоках і більшу достовірність прогнозу стійкості як окремих оголень, так і камер загалом. Визначено закономірності впливу кута падіння рудного покладу, товщини стелини та ступеня її порушеності гірничими виробками на несучу здатність і стійкість стелин та визначено залежність впливу коефіцієнта зменшення міцності стелини  $K_{кр}$  від дії на неї кислотного розчину при використанні технології підземного блокового вилуговування уранових руд з відпрацюванням спарених по висоті блоків.

Установлено, що при відпрацюванні бідних урановмісних руд із застосуванням технології підземного блокового вилуговування спареними по висоті блоками товщина тимчасового міжповерхового цілика-стелини визначається із урахуванням коефіцієнта зменшення міцності стелини від дії на неї кислотного розчину  $K_{кр}$ , який визначається як відношення межі міцності уранових руд, що зазнали дії кислотного розчину, до межі міцності вихідних зразків, які не мали такого впливу, і змінюється за поліноміальною залежністю від 0,66 до 0,6 при технологічному терміні дії на уранові руди кислотного розчину від 2 до 6 місяців (рис. 6).

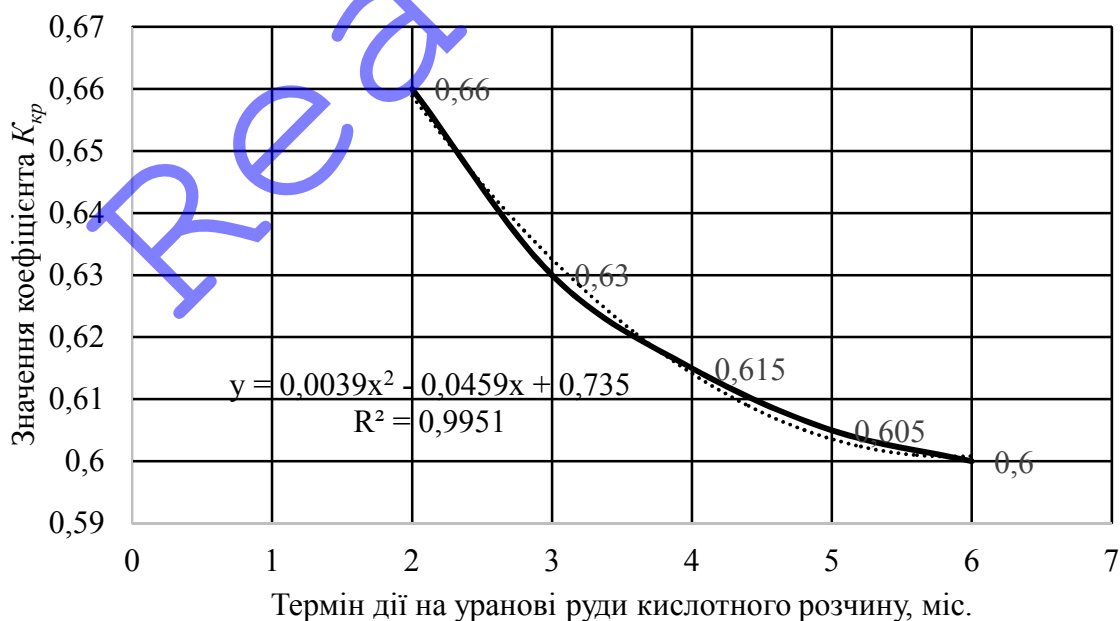


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта  $K_{кр}$  від терміну дії на уранові руди кислотного розчину

Установлена закономірність добре описується поліноміальною залежністю виду:

$$K_{кр} = 0,0039t^2 - 0,0459t + 0,735, \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9951,$$

де  $t$  – термін дії на уранові руди кислотного розчину, міс.;

$R^2$  – величина достовірності апроксимації.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженням і розробленню технологічних рішень, які запобігають утворенню провалів земної поверхні при підземному видобутку залізних руд.

Відомо, що відпрацювання залізних руд підземним способом здійснюється в Кривбасі понад 135 років. У результаті підземної розробки залізрудних родовищ утворилися зони воронок, провалів і терас, порушень цілісності денної поверхні. Порушено величезні території земельних угідь, потенційно придатних до сільськогосподарської діяльності, промислового й цивільного використання. Дані території належать до так званих «зон обвалення», розташованих у всячому боці покладів, які мають ширину в кілька кілометрів і простягаються з півночі на південь на десятки кілометрів, виводячи з цивілізованого використання практично всю західну частину міста Кривий Ріг. У «зону обвалення» потрапляють цілі міські житломасиви, такі як Карнаватка, селище Куйбишеве, селище Горького та ін. Процеси зрушень на денній поверхні мають динамічний характер і є результатом постійного підземного видобутку залізних руд. Відповідно збільшується «зона обвалення», у яку потрапляють промислові та цивільні об'єкти.

Дослідження процесу розвитку зсувів і провалів у результаті підземних гірничих робіт має фундаментальне значення для Криворізького басейну.

Найбільше поширення й розвиток процесу зміщення гірських порід і земної поверхні спостерігаються при розробці потужних рудних покладів системами розробки з обваленням руди та вміщуючих порід камерними системами розробки.

Розрахунок імовірності утворення воронок із урахуванням обсягу обвалених порід у пустоти, коефіцієнта їх розпушення, кута падіння рудного тіла та площі оголення очисної камери рекомендується робити виходячи з умов, що для утворення воронки необхідно, аби приріст обсягу налягаючих обвалених порід  $V_{nn}$  за рахунок коефіцієнта розпушення  $k_p$  був меншим за обсяг пустот від очисного виймання  $V_n$ :

$$V_{nn} \cdot k_p < V_n. \quad (9)$$

Таким чином доведено, що на характер і параметри процесу зміщення гірських порід та утворення на земній поверхні провалів і воронок впливають геологічні й технологічні чинники, до яких належать: фізико-механічні властивості гірських порід, геологічна будова товщі й гідрогеологічні умови, тектонічні порушення масиву гірських порід, кут падіння покладів, потужність родовища, глибина розробки, потужність наносів, рельєф земної поверхні, застосовані системи розробки, швидкість ведення очисних робіт тощо.

Слід зазначити, що перспективи розвитку підземного Кривбасу з видобутку багатих залізних руд досить об'єктивно прораховані на кілька найближчих десятиліть, а перспективи видобутку магнетитових кварцитів підземним способом реальні на найближче сторіччя й більше. Тому збільшення «зони обвалення» з розвитком зони воронки, провалів і терас та порушень цілісності денної поверхні в Криворізькому басейні – об'єктивна реальність.

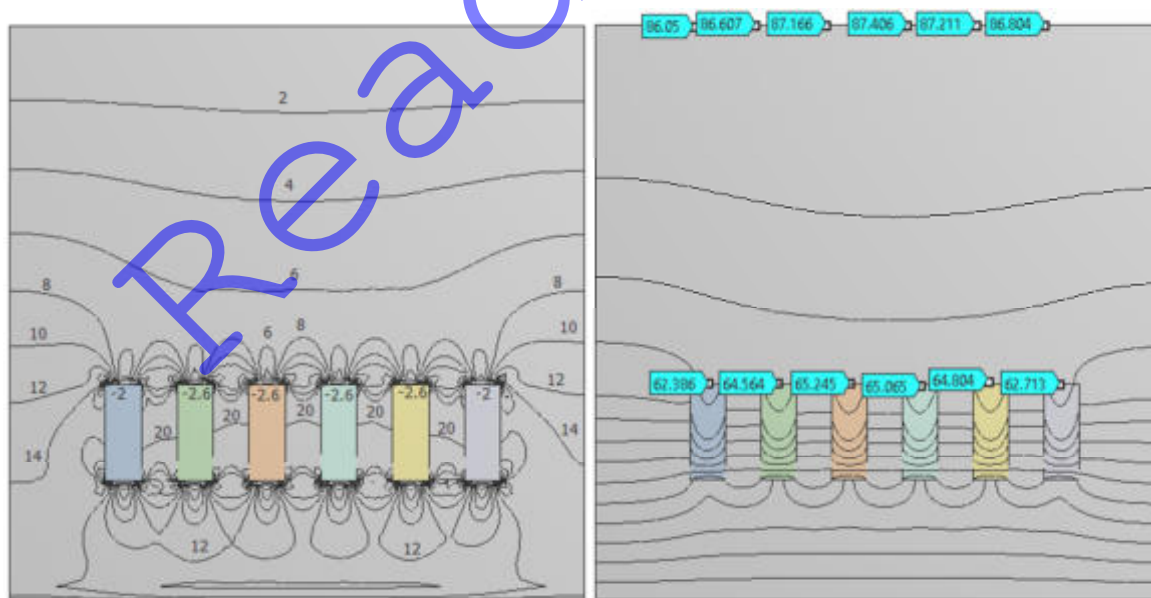
На наш погляд, єдиним розв'язанням визначеної проблеми є заповнення відпрацьованих камер закладними сумішами.

Дослідження й розроблення теоретичних основ впливу штучного поля напружень на розвиток геомеханічних процесів при вийманні корисної копалини камерними системами розробки із закладенням виробленого простору є досить складним детермінованим процесом.

Розрахунок адекватних напружень і деформацій здійснювався на базі програмного комплексу Ansys 16.2. Дослідження динаміки трансформації напружено-деформованого стану гірського масиву для умов повного виймання камер першої черги без подальшого закладення виробленого простору дозволили встановити ключові закономірності деформації в контрольних точках гірського масиву на денній поверхні над очисним простором відпрацьованих блоків і на контакті зі стеліною відпрацьованих камер першої черги.

Варіація відповідних величин деформацій у контрольних точках гірського масиву досягає 18–21 %.

На рис. 7 представлено динаміку трансформації напружено-деформованого стану масиву при вийманні та закладенні заключної камери першої черги твердіючою закладкою.



а)

б)

Рисунок 7 – Результати розрахунку головних напружень  $\sigma_1$  (а) і деформацій  $\epsilon$  (б) при вийманні та закладенні заключної камери першої черги твердіючою закладкою

Варіація відповідних величин деформацій у контрольних точках гірського масиву досягає 12–14 %.

Вертикальні деформації структурно неоднорідного масиву залежать від кількості відпрацьованих і закладених камер першої черги. Величина вертикальних деформацій денної поверхні добре апроксимується логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = 5,742 \ln(n) + 77,054, \quad (10)$$

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

Величина вертикальних деформацій у контрольних точках гірського масиву над очисним простором відпрацьованих камер добре апроксимується логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = 5,273 \ln(n) + 55,934, \quad (11)$$

де  $\varepsilon$  – величина максимальних вертикальних деформацій у контрольних точках гірського масиву, мм;  $n$  – кількість відпрацьованих і закладених камер першої черги.

Установлена кореляційна залежність дозволяє говорити про доволі вагомий вплив твердіючої закладки на стійкість геотехнічної системи «гірський масив – штучний масив твердіючої закладки».

На рис. 8 представлено динаміку трансформації напружено-деформованого стану масиву на кінцевому етапі заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами в якості інертної закладки.

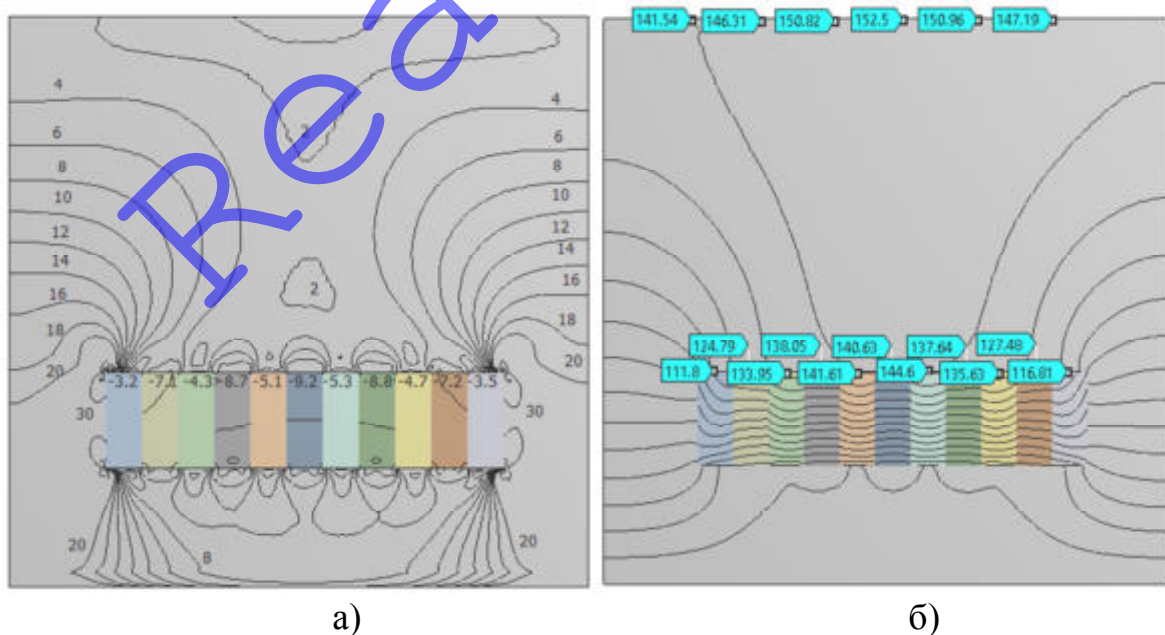


Рисунок 8 – Результати розрахунку: а) головних напружень  $\sigma_1$  (МПа); б) деформацій  $\varepsilon$  (м) після завершального етапу заповнення камер другої черги подрібненими пустими породами

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.

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

$$\varepsilon = -2,364n^2 + 26,036n + 84,36, \quad (12)$$

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

Величина вертикальних деформацій у контрольних точках гірського масиву над очисним простором відпрацьованих і закладених камер другої черги добре апроксимується поліноміальною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = -3,171n^2 + 31,289n + 66,04, \quad (13)$$

де  $\varepsilon$  – величина вертикальних деформацій у контрольних точках гірського масиву, мм;  $n$  – кількість відпрацьованих і закладених камер другої черги.

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

Закладення виробленого простору, зазвичай, вимушений захід. Основною перевагою закладення є збереження денної поверхні й налягаючих гірських порід. До основних недоліків закладення камер належить ускладнення технології та підвищення собівартості видобутку.

Для ліквідації зазначених недоліків автори запропонували технологію комбінованого закладення камер з каркасом твердіючої закладки та породним модулем усередині сформованої структури, яка отримала назву «каркасно-модульної» технології закладення. Запропонована технологія комбінованого «каркасно-модульного» закладення камер може бути рекомендована для заповнення камер як першої, так і другої черг при відпрацюванні родовищ за технологією «камера – цілик». Однак основною перевагою даної технології можна вважати доцільність її застосування в камерах першої черги.

Оскільки каркасно-модульний цілик знаходиться в умовах об'ємного стиснення, його стійкість практично не залежить від ширини каркаса й коливається в межах 3–8 % у відносних величинах. Стійкість оголень каркаса твердіючої закладки залежить загалом від міцності закладки й величини оголення закладного масиву.

Виконані дослідження дозволили констатувати, що величина деформації денної поверхні при камерному вийманні магнетитових кварцитів із закладенням камер знижується на 55–95 % і знаходиться в поліноміальній

залежності від глибини розробки, кількості відпрацьованих горизонтів, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, а також структури штучного цілика, каркасно-модульна будова якого забезпечує зниження величини деформації на 75–80 % при скороченні собівартості закладних робіт на 43–54 %.

**П'ятий розділ** присвячено дослідженням та обґрунтуванню концепції застосування інформаційних технологій для моніторингу та управління напружено-деформованим станом гірського масиву при видобутку залізних руд підземним способом.

На наш погляд, сьогодні необхідно перейти до динамічної моделі вивчення й контролю денної поверхні Криворізького басейну. У зв'язку з цим, необхідним є комплексний підхід до виконання досліджень маркшейдерсько-геодезичної спрямованості з використанням різних методів спостереження природних і техногенних процесів на земній поверхні та в її надрах, виділяючи при цьому вплив підземних гірничих робіт на характер геодинамічних порушень денної поверхні.

Моніторинг денної поверхні в полях діючих і законсервованих шахт Кривбасу повинен бути виконаний на основі комплексу робіт з первинного оцінювання ситуації для кожного елемента довкілля. Результати досліджень необхідно представити у вигляді матеріалів, які дозволять оцінити кількість і просторове розташування небезпечних ділянок, для яких потрібно виконати обов'язковий моніторинг із урахуванням сучасних технологій досліджень.

Одержані матеріали повинні забезпечити створення бази даних з основних проблемних ділянок денної поверхні. Ці дані повинні оновлюватися з достатньою регулярністю, аж до технологій он-лайн спостережень. Основою для оброблення й аналізу одержаної інформації буде постійно поповнювана інформаційна база, яку буде покладено в основу геоінформаційної системи (ГІС) моніторингу денної поверхні.

На підставі одержаної інформації планується створення механізмів попередження й подолання надзвичайних ситуацій у Криворізькому регіоні на основі розробленої системи планування оперативних заходів.

Перспективними засобами досліджень зсувів денної поверхні може бути використання волоконно-оптичних засобів вимірювання й застосування новітніх нівелірів, GPS-обладнання, аналіз перспективних напрямків і модернізація сучасних технологій проведення спостережень. Такі відомі компанії корпорації Hexagon, як Leica Geosystems, Intergraph і GeoMos, пропонують використовувати GPS для забезпечення точної географічної прив'язки за допомогою технологій InSAR і LIDAR.

На наш погляд, розроблення геоінформаційної системи попередження й моніторингу за осіданням територій Криворізького залізрудного басейну повинне розв'язувати дві основні проблеми: попередження можливих деформацій і розкриття причин та закономірностей розвитку таких деформацій. На першому етапі необхідно виконати попереднє моделювання й запустити пілотний проект на невеликій території, наприклад, для східного борта Глеєватського кар'єру ПрАТ «Центральний ГЗК» у зоні впливу підземних



гірничих робіт або території шахтного відведення закритого й ліквідованого РУ ім. Ілліча.

Такий пілотний проект дозволив би зацікавленим сторонам визначитися з можливостями й бажаннями партнерів і був би частиною меморандуму про взаєморозуміння між владою міста, Криворізьким національним університетом та GeoMos AG. Остання виступає як консультант і представляє інтереси групи Hexagon і партнерів.

Проведено короткий аналіз можливості застосування спеціалізованого програмного забезпечення для розв'язання вищезазначених завдань.

Установлено, що для створення 3D-моделі гірського масиву доцільно застосувати програмний пакет для моделювання геомеханічних процесів Move фірми Midland Valley. Даний програмний продукт дозволяє виконувати збір цифрових даних, картографування територій, створення 3D моделі гірського масиву (рис. 9), проводити геомеханічне моделювання, моделювання з руйнуванням, здійснювати аналіз напружень і т.ін.

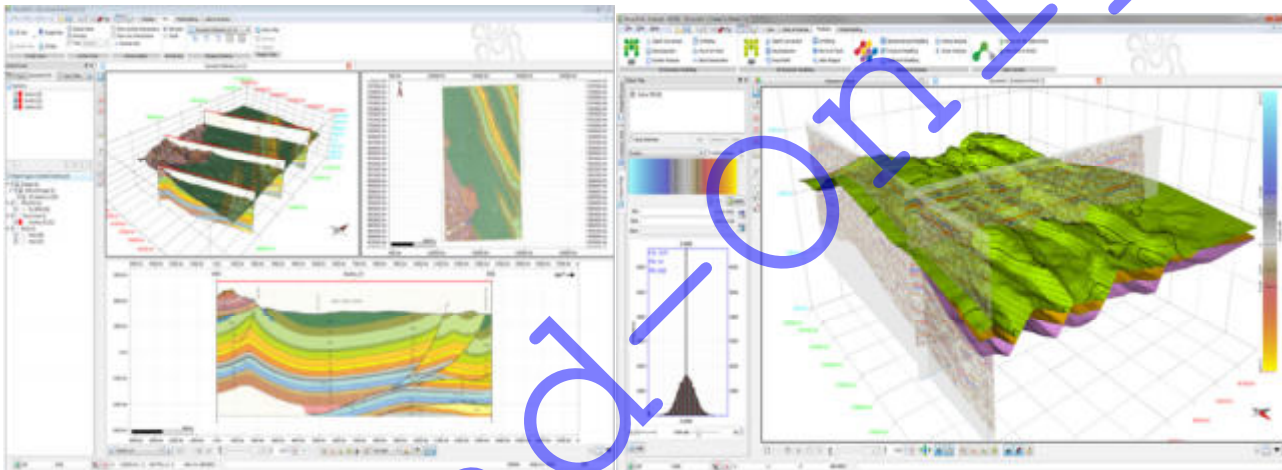


Рисунок 9 – Створення 3D-моделі гірського масиву

Доведено необхідність створення геоінформаційної системи гірничодобувного регіону, яка включає розроблення й організацію головного геоінформаційного центру та створення геоінформаційних центрів на суб'єктах господарської діяльності. Такий центр забезпечить ефективний оборот інформації про досліджувані території, дозволить сформувати централізовану систему оперативного забезпечення актуальною просторовою інформацією та створить умови для ефективного та якісного забезпечення розв'язання стратегічних і оперативних завдань безпечного функціонування небезпечної території.

У шостому розділі наведено результати розроблення й упровадження нових технологій відпрацювання залізних руд з можливістю збереження земної поверхні Криворізького басейну.

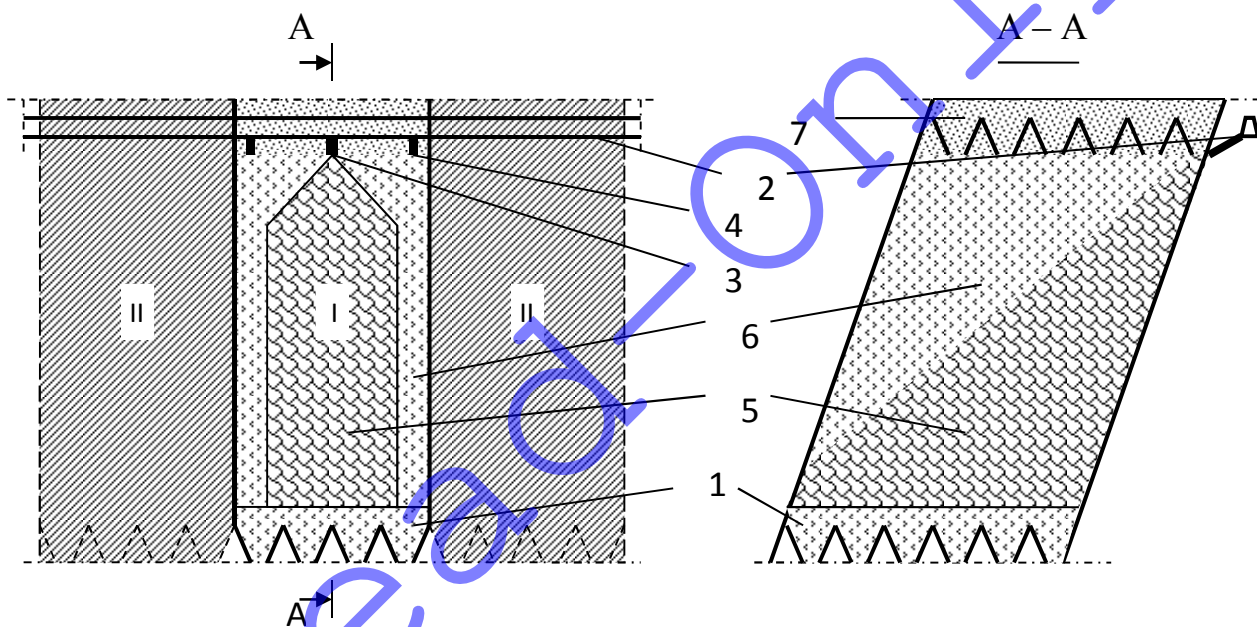
Запропоновано технологію комбінованого «каркасно-модульного» закладення камер першої черги при відпрацюванні родовищ за технологією «камера – цілик» (патент України № 114837).

Сутність технології представлена на рис. 10.

Спочатку відпрацьовують очисну камеру першої черги з повним випуском відбитої руди. Після випуску відбитої руди днище блока (очисної камери першої черги) заповнюють твердіючою закладкою 1 для формування стійкої стелени, необхідної для подальшого відпрацювання нижче розташованої камери. Закладення камери здійснюють по закладних свердловинах 4, пробурених із закладної виробки 2 в покрівлю відпрацьованої камери першої черги.

Після повного затвердіння суміші 1 із закладної виробки 2 в центр покрівлі відпрацьованої камери по закладних підняттях 3 подають пусту породу 5. Закладний підняттявий проходять на лежачий бік камери під кутом, достатнім для скочування кусків пустої породи під дією власної ваги.

Паралельно, по закладних свердловинах 4, пройдених у покрівлю відпрацьованої камери по межах із ціликами (камерами другої черги), подають твердіючу закладку 6, необхідну для формування стійкого каркаса твердіючої закладки на межі з камерами другої черги.



- I, II – черговість відпрацювання камер; 1 – твердіюча закладка днища блока;  
 2 – закладна виробка; 3 – закладний підняттявий; 4 – закладні свердловини;  
 5 – «модуль» закладки з пустої породи; 6 – твердіюча закладка;  
 7 – твердіюча закладка вищележачого горизонту

Рисунок 10 – Технологічна схема комбінованого «каркасно-модульного» закладання камер першої черги при відпрацюванні родовищ за технологією «камера-цілик»

Після максимального заповнення камери пустими породами 5 решту виробленого простору заповнюють твердіючою закладкою 6, формуючи таким чином каркас твердіючої закладки з внутрішнім «модулем» пустих порід.

Випуск обваленої руди на контакті з твердіючим штучним масивом при відпрацюванні блока системами розробки з обваленням руди та вміщуючих порід аналогічний випуску руди на контакті з монолітним рудним масивом.

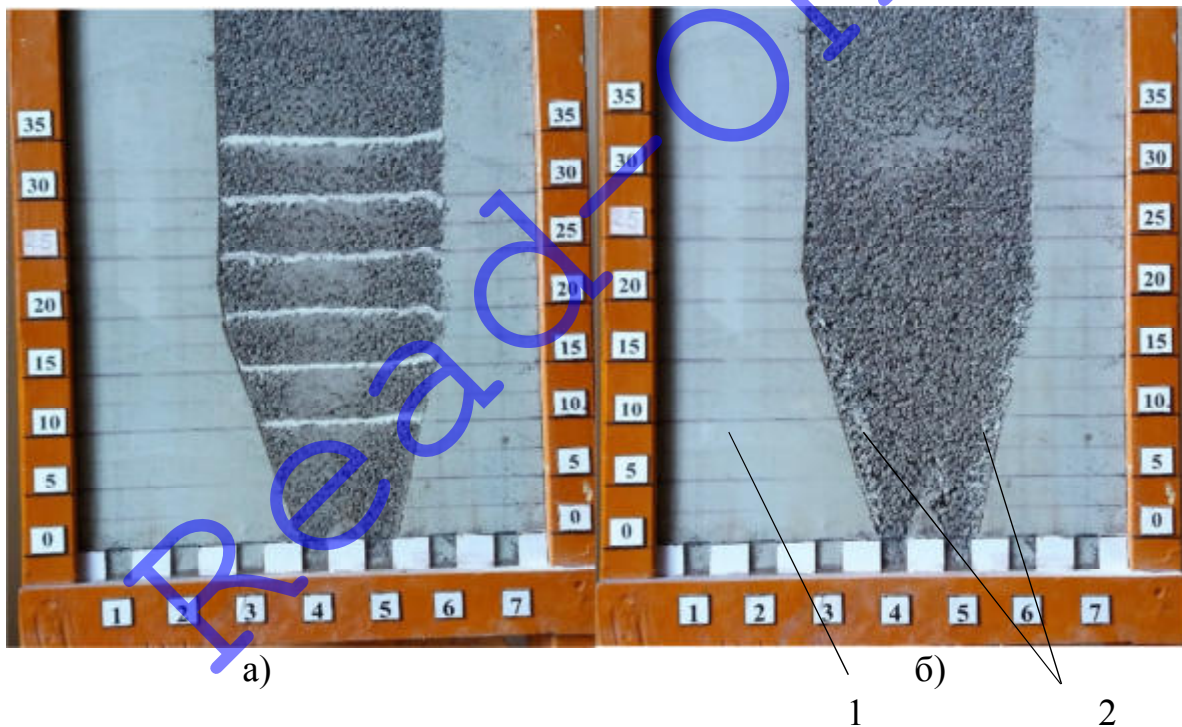
Основним недоліком даного випуску є наявність втрат руди у гребенях між випускними отворами й на контакті з твердіючим закладним масивом. На них припадає до 7–12 % загальних втрат руди по блоку.

Для підтвердження висловлених припущень, вивчення закономірностей формування й визначення контурів гребенів після повного випуску обваленої руди з блоків другої черги було виконано лабораторні дослідження з випуску обваленої руди на межі з твердіючим закладним масивом.

У першій серії досліджень моделювалися умови випуску обваленої руди з блока другої черги, розташованого на контакті з твердіючим закладним масивом камер першої черги. Поверхня контакту приймалася вертикальною, аналогічною поверхні контакту при класичних технологіях відпрацювання очисних блоків.

Друга серія експериментів (II варіант) передбачала формування бічної поверхні нижньої частини камери з нахилом у бік камер другої черги.

На рис. 11 представлено стадії випуску відбитої руди з камери другої черги на контакті з похилими бічними поверхнями твердіючої закладки камер першої черги та формування втрат відбитої руди в гребенях на контакті з твердіючим закладним масивом.



1 – твердіюча закладка камер першої черги, 2 – втрати руди в гребенях на контакті із закладкою камер першої черги

Рисунок 11 – Початкова (а) та кінцева (б) стадії випуску відбитої руди з камери другої черги на контакті з похилими бічними поверхнями твердіючого закладного масиву камер першої черги

На рис. 12 представлено залежності втрат руди в гребенях від кута нахилу бічної поверхні трапецеїдального днища на межі зі штучним масивом камер першої черги при різній висоті блока.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив установити такі закономірності. Сумарна величина втрат руди в гребенях  $\Pi$  (%) залежно від кута нахилу бічної поверхні трапецеїдального днища на межі зі штучним масивом камер першої черги при диференційованій висоті блока добре апроксимується поліноміальною кривою другого порядку й визначається з виразу:

$$\Pi = (0,0258\beta^2 - 3,7275\beta + 131,18) \cdot 1,5487e^{-0,0099h_n}, \quad (14)$$

$$R^2=0,9993,$$

де  $h_n$  – висота панелі, що відпрацьовується, м;  $\beta$  – кут нахилу бічної поверхні трапецеїдального днища на межі зі штучним масивом камер першої черги;  $R$  – достовірність апроксимації.

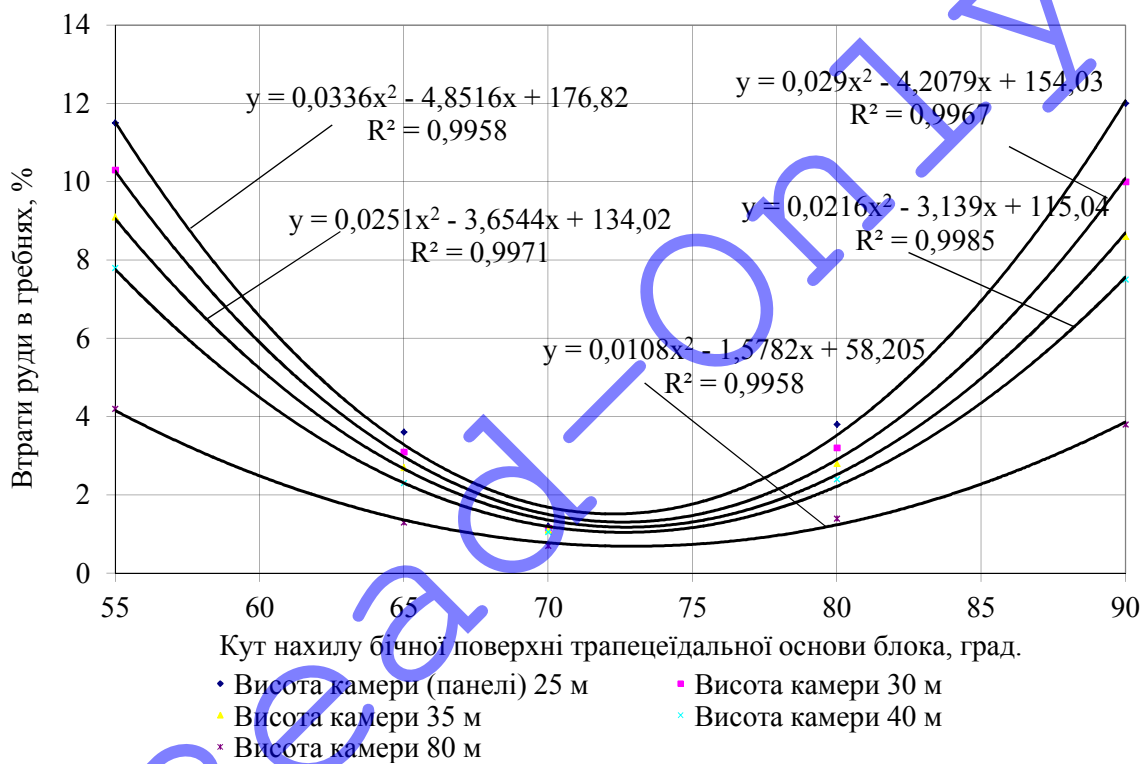


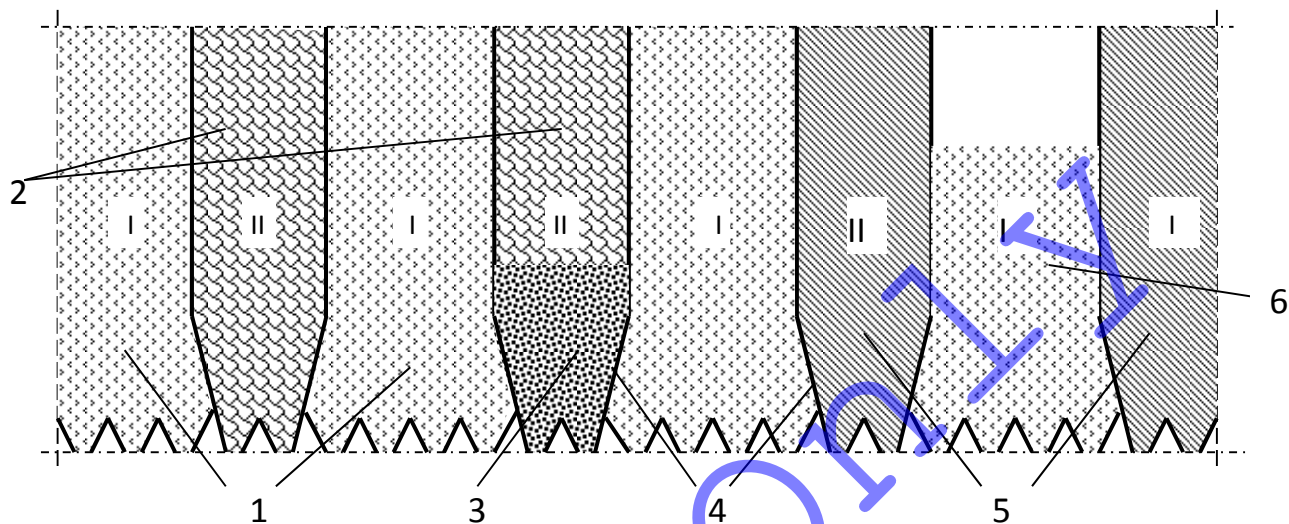
Рисунок 12 – Залежності втрат руди в гребенях від кута нахилу бічної поверхні трапецеїдального днища на межі зі штучним масивом камер першої черги при різній висоті блока

Доведено, що втрати руди в гребенях відпрацьованих блоків другої черги на контакті зі штучним масивом закладених камер першої черги експоненційно залежать від висоти відпрацьованих блоків, поліноміально від кута нахилу бічних поверхонь трапецеїдальної основи штучних ціликів і при формуванні кутів нахилу, адекватних твірній воронки випуску, знижуються до величин 0,7–1,2 %, дозволяючи збільшити вилучення руди з блока на 4,1–7,8 %.

На підставі встановлених закономірностей випуску відбитої руди на контакті з твердіючим закладним масивом розроблено технологічну схему

відпрацювання ділянки шахтного поля з трапецієподібною формою основи блоків і комбінованою закладкою очисного простору.

Рекомендована технологія формування трапецієподібного днища блока з похилими бічними поверхнями нижньої частини камер першої черги дозволяє ліквідувати втрати руди в гребенях на контакті з твердіючим закладним масивом камер першої черги після повного випуску обваленої руди з блоків другої черги. Сутність пропонованої технології з трапецеїдальною формою основи блоків і комбінованою закладкою представлено на рис. 13.



1 – твердіюча закладка, 2 – пусті породи, 3 – відбита руда, 4 – похилі стінки основи блоків, 5 – рудний масив, 6 – заповнення камери твердіючою закладкою

I, II – відповідно блоки першої та другої черг

Рисунок 13 – Технологічна схема відпрацювання ділянки шахтного поля з трапецеїдальною формою основи блоків і комбінованою закладкою

Спочатку відпрацьовуються камери першої черги з формуванням бічної поверхні нижньої частини камери з нахилом у бік камер другої черги. Кут нахилу бічної поверхні нижньої частини камери першої черги приймається адекватним твірній воронки випуску блоків другої черги. При камерному випуску руди з блоків першої черги відбувається її повне витікання, включаючи прирощений обсяг нижньої частини камери.

Наступним етапом є заповнення камери першої черги закладним матеріалом. Після набору міцності починають відпрацювання блоків другої черги системами розробки з обваленням руди та вміщуючих порід.

Формування днища блока другої черги з похилими бічними поверхнями, адекватними твірній воронки випуску, дозволяє практично ліквідувати втрати руди в гребенях на контакті з твердіючим закладним масивом.

Важливим завданням з управління напружено-деформованим станом масиву при формуванні підземних штучних споруд є визначення економічних ризиків від можливих порушень земної поверхні в результаті підземного видобутку залізних руд. Економічне оцінювання геомеханічних ризиків, що характеризуються можливими порушеннями денної поверхні в полях закритих і

діючих шахт Кривбасу, покликане забезпечити прогнозованість витрат на ліквідацію можливих наслідків цих порушень з урахуванням імовірності їх виникнення.

В цілому, річний економічний ефект від упровадження у виробництво технологічних рішень, розроблених у дисертаційній роботі, складе на гірничодобувних підприємствах Криворізького басейну 1314,714 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-прикладною роботою, у якій шляхом встановлення закономірностей деформацій денної поверхні залежно від глибини розробки, кута падіння покладу, фізико-механічних властивостей гірських порід і матеріалу закладки, форми стелини очисних камер та структури штучного цілика розв'язана важлива науково-технічна проблема розвитку наукових основ управління процесами взаємодії полів напружено-деформованого стану масиву при формуванні підземних гірничих виробок, що дозволило обґрунтувати параметри та розробити технології відпрацювання рудних покладів, упровадження яких дозволяє отримати очікуваний економічний ефект у розмірі 1314,714 тис. грн, що є важливим для підвищення ефективності та безпеки підземного видобутку руд на глибинах до 2000 м, збереження непорушеної земної поверхні та дозволяє утилізувати відходи гірничого виробництва у виробленому просторі шахт.

Основні наукові та практичні результати роботи:

1. У результаті аналізу встановлено, що будь-яка природна або техногенно-природна система спрямована на встановлення в ній природної рівноваги при утворенні нових елементів. У природних умовах розвиток таких елементів відбувається під впливом природних процесів і явищ протягом тривалого часу, що деякою мірою попереджає виникнення надзвичайних ситуацій. Техногенна діяльність людини відбувається миттєво, що позбавляє природні системи основного фактора – їх розвитку в часі, і є передумовою виникнення надзвичайних ситуацій. Підвищення глибини розробки родовищ призводить до значного підвищення гірського тиску. У зв'язку з цим, особливі вимоги при проектуванні очисного виймання на великих глибинах висуваються до стійкості оголень очисних камер.

2. Уперше встановлено, 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 й знаходиться в поліноміально-логарифмічній залежності від глибини розробки, міцності залізних руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини та при її склепистій формі набуває мінімальних значень, дозволяючи формувати стійкі оголення стелин очисних камер на глибинах до 2000 м.

3. Уперше доведено, що величина деформації денної поверхні при камерному вийманні магнетитових кварцитів із закладкою знижується на 55–95 % і знаходиться в поліноміальній залежності від глибини розробки, кількості відпрацьованих горизонтів, фізико-механічних властивостей гірських порід і

матеріалу закладки, а також структури штучного цілика, каркасно-модульна будова якого забезпечує зниження величини деформації на 75–80 % при скороченні собівартості закладних робіт на 43–54 %.

4. Уперше визначено закономірності впливу кута падіння рудного покладу, товщини стелини та ступеня її порушеності гірничими виробками на несучу здатність та стійкість стелин і визначено залежність впливу коефіцієнта зменшення міцності стелини  $K_{кр}$  від дії на неї кислотного розчину при використанні технології підземного блокового вилуговування уранових руд із відпрацюванням спарених по висоті блоків.

5. Уперше встановлено, що втрати руди в гребенях відпрацьованих блоків другої черги на контакті зі штучним масивом закладених камер першої черги експоненційно залежать від висоти відпрацьованих блоків, поліноміально від кута нахилу бічних поверхонь трапецеїдальної основи штучних ціликів і при формуванні кутів нахилу, адекватних твірній воронки випуску, знижуються до величин 0,7–1,2 %, дозволяючи збільшити видобування руди з блока на 4,1–7,8 %.

6. Результати дисертаційної роботи використано при розробленні:

– проектів на відпрацювання запасів залізорудної сировини на шахтах Криворізького залізорудного басейну ДП ДПІ «Кривбаспроект»;

– технології формування шатрових стелин компенсаційних камер при видобутку залізних руд на глибоких горизонтах шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» на підставі розроблених методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в умовах родовища шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком»;

– технології формування склепистих стелин при видобутку залізних руд на значних глибинах на підставі розроблених методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» на шахтах ПрАТ «Євраз Суха Балка».

7. Розроблено методики:

– дослідження напружено-деформованого стану масиву математичними методами;

– фізичного моделювання стійкості масиву при формуванні та підтримці підземних гірничих виробок.

– проведення експериментально-промислових досліджень стійкості елементів очисних камер на шахтах ДП «СхідГЗК».

8. Розроблено «Інструкцію з визначення безпечних та стійких параметрів очисних блоків на шахтах ДП «СхідГЗК».

9. Розроблено методичні рекомендації:

– «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в умовах шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком»;

– «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» для шахт ПрАТ «Євраз Суха Балка».

10. Розроблено Стандарт підприємства (СТП):

- «Методика расчета удельных норм расхода основных материальных ресурсов подземного горнодобывающего комплекса ГП «ВостГОК»;
- «Нормы расхода основных материалов на ведение горных работ в условиях шахтоуправления при подземной добыче руды (на правах шахт) горного департамента ПАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ».

11. Визначено економічну ефективність запропонованих технологій. Економічний ефект по шахті «Родіна» досягається за рахунок упровадження рекомендованої технології формування похилих стелин компенсаційних камер, що призводить до зменшення виходу негабариту при відбійці на 0,15–0,3%, поліпшення показників випуску і вилучення багатих руд на 0,2–0,4%, що в свою чергу призведе до зниження собівартості видобутку руди по блоку в середньому на 0,65 грн / т. При річному видобутку шахти «Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» у межах  $A_p = 1,5$  млн т річний економічний ефект від упровадження рекомендованої технології формування похилих стелин компенсаційних камер складе 975000 грн.

По шахтах ПрАТ «Євраз Суха Балка» річний економічний ефект від упровадження у виробництво технологічних рішень, розроблених у дисертаційній роботі, складе 339714 тис. грн. Економічний ефект досягається за рахунок вибору та обґрунтування стійких форм оголень очисних камер, що дозволить запобігти руйнуванню стелин та скороченню втрат глибоких свердловин на 4,8% (1398 м/на рік).

Сумарний річний очікуваний економічний ефект від упровадження у виробництво технологічних рішень, розроблених у дисертаційній роботі, складе на гірничодобувних підприємствах Криворізького басейну 1314,714 тис. грн.

12. Обґрунтованість і достовірність положень, висновків і рекомендацій підтвержені використанням апробованих методів механіки гірських порід, адекватністю розроблених математичних моделей реальним об'єктам і процесам гірничого виробництва, досліджень сипучого середовища при моделюванні випуску руди з блоків, коректним узгодженням результатів аналітичних досліджень з даними лабораторних дослідів і натурних спостережень (похибка не перевищує 10–15%), результатами практичного використання розробок і рекомендацій в умовах шахт Криворізького басейну та ДП «СхідГЗК».

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті, які включені до міжнародних наукометричних баз,  
статті у наукових виданнях інших держав та у наукових  
фахових виданнях України**

1. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування самохідної техніки на шахтах Кривбасу / Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпропетровськ, 2012. №5(131). С. 39–42.  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2012\\_5\\_9\\_](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2012_5_9_) (Scopus).



2. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В. Економічна оцінка ризиків можливих геомеханічних порушень денної поверхні в полях шахт Кривбасу / Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпропетровськ, 2012. №6(132). С. 126–130.

[http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu\\_2012\\_6\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2012_6_22), (Scopus)

3. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В. Визначення економічних ризиків від порушень денної поверхні в результаті підземного видобутку руд / Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2012. Вип. 32. С. 246–250.

4. Stupnik N., Kalinichenko V., Kalinichenko E., Pismennij S. Features of underlying levels opening at "ArcelorMittal Krivyi Rih" underground mine / Theoretical and Practical Solution of Mineral Resources Mining: CRC Press is an imprint of the Taylor&Francis Group, an informa business A BALKEMABOOK, 2015. С. 39–45.

<https://www.researchgate.net/publication/327965456>. (Scopus).

5. 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>. (Scopus).

6. 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/](http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_7/060Stupn/). (Web of Science, Scopus).

7. Калініченко О.В. Удосконалення концепції управління напружено-деформованим станом гірського масиву при підземних гірничих роботах / Сборник научных трудов Государственного предприятия "Научно-исследовательский горнорудный институт". Кривой Рог, 2015. С.104–111.

8. Калініченко О.В. Удосконалення концепції системного управління процесами підземних гірничих робіт з урахуванням впливу на них напружено-деформованого стану гірського масиву / Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. Кривий Ріг, 2016. Вип. 100. С. 27–31.

9. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O., Fedko M. Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials / Mining of Mineral Deposits, National Mining University, 2016. Volume 10. Issue 3. P. 46 – 52.

<https://doi.org/10.15407/mining10.03.046>. (Web of Science, Scopus).

10. Калініченко О.В. Підвищення показників вилучення залізних руд при випуску обваленої рудної маси на контакті з твердіючим штучним масивом / Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2017. Вип. 45. С. 118–122.

11. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Федько М.Б., Калініченко О.В., Музика І.О., Письменний С.В. Удосконалення методики визначення

параметрів буровибухових робіт з урахуванням напружено-деформованого стану масиву при його обваленні на похиле оголення / Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. Кривий Ріг, 2017. Вип. 102. С. 47–53.

12. The study of the stress-strain state of the massif in mining uranium at «Vostgok» deposits, 2018, M. Stupnik, V. Kalinichenko, O. Kalinichenko. Innovative development of resource-saving technologies for mining: Multi-authored monograph. Sofia: Publishing House «St. Ivan Rilski», University of mining and geology, P. 45–55.

13. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Федько М.Б., Маліновський Ю.О., Калініченко О.В., Пухальський В.М., Кривохін Б.І. Визначення товщини стелин при підземному вилуговуванні уранових руд з їх відпрацюванням спареними по висоті блоками / Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2018. Вип. 46. С. 3–9.

14. Substantiation of stable crown shapes in iron ore mining, 2018, Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Kalinichenko E.V. Topical issues of resource-saving technologies in material mining and processing: Multi-authored monograph. Petrosani: UNIVERSITAS Publishing University of Petroșani, P.P. 27 – 38.

15. Калініченко О.В. Управління процесами підземних гірничих робіт з урахуванням впливу на них напружено-деформованого стану гірського масиву / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «технічні науки», 2018. Том 29 (68). №2. С.232–236.

16. Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko E.V. Determining the qualitative composition of the equivalent material for simulation of Kryvyi Rih iron ore basin rocks / Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпро, 2018. № 4. С. 21–27 .

<https://doi.org/10.29202/nvngu/20184/4>. (Scopus).

17. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Письменний С.В., Федько М.Б. Моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву шахти «Гігант-Глибока» при застосуванні технології з твердіючою закладкою / Геотехнічна механіка: міжвідомчий збірник наукових праць. Дніпро, 2017. Вип. 135. С. 229–238.

18. Ступнік М.І., Калініченко О.В. Дослідження та моделювання напружено-деформованого стану стелин шатрової та склепистої форми / Геотехнічна механіка: міжвідомчий збірник наукових праць. Дніпро, 2018. Вип. 139. С.70–77.

19. Калініченко О.В. Дослідження напружено-деформованого стану масиву математичними методами / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «технічні науки», 2018. Том 29 (68). №5. С.133–137.

20. Калініченко В.О., Письменний С.В., Бровко Д.В., Калініченко О.В. Моделювання стійкості штучних споруд при розробці залізних руд / Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2018. Вип. 103. С.39–44.

21. Калініченко В.О., Письменний С.В., Калініченко О.В. Розкриття запасів залізних руд Криворізького басейну підземним способом нижче

глибини 1500...1700 м / Збірник наукових праць "Вісник НУВГП". Рівне, 2018. Випуск 1 (81). Серія "Технічні науки". С.229-240.

22. Kalinichenko V., Pysmennyi S., Shvaher N., Kalinichenko O. Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin / E3S Web of Conferences, 60, art. no. 00041 (2018). 10p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000041>. (Scopus).

23. Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Fedko M.B., Kalinichenko E.V. Technology of underground block leaching at underground mines of "vostgoc" / Resource and resource-saving technologies in mineral mining and processing: Multi-authored monograph. Petrosani, Romania, UNIVERSITAS Publishing, 2018. P.4–15.

24. Stupnik M., Kalinichenko O. Investigation of muck drawing in blocks with trapezoid sills / E3S Web Conf. Volume 60, art. no. 00021 (2018). 7 p. Ukrainian School of Mining Engineering.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000021>. (Scopus).

25. Stupnik, M., Kalinichenko, O., Kalinichenko, V., Pysmennyi, S., & Morhun, O. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining / Mining of Mineral Deposits, 2018. 12(4). P.56-62.

<https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>. (Scopus).

26. 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> (doi: 10.29202/nvngu/2018-6/5). (Scopus).

27. Stupnik M., Kalinichenko V., Rymarchuk B., Pysmennyi S., Fedko M., Kalinichenko E. Improvement of the method of drilling and blasting operations at the use of explosive substance «Ukrainite» in underground mining works / Technology audit and production reserves, 2018. № 6/1(44). С. 29 – 35.

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152055. (Scopus).

28. Калініченко О.В. Фізичне моделювання стійкості масиву при формуванні та підтримці підземних гірських виробок / Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2018. Вип. 47. С. 97-102.

29. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Грищенко М.А.. Випуск руди з малорухомої зони на лежачому боці покладу похилим очисним вибоєм / Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2018. Вип. 104. С.3–8.

30. Калініченко О.В. Методика та порядок виконання експериментальних досліджень на моделях з еквівалентних матеріалів / Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. Рівне, 2018. Вип. 3(83). С.155-161.

31. Калініченко О.В. Дослідження напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні і закладці очисних камер першої черги твердіючою закладкою/ Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. – Рівне, 2018. Вип. 4(84). С.78–88.

32. Калініченко О.В. Дослідження напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні покладу з суцільною та комбінованою «каркасно-

модульною» технологією закладки камер / Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. Рівне, 2019. Вип. 2(86). С.141 – 153.

33. Fedko M.B., Muzika I.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko O.V. Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of ores / Науковий вісник Національного гірничого університету. Дніпро, 2019. № 1. С. 37–42.

<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/20>. (Scopus).

34. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В. Дослідження трансформації напружено-деформованого стану масиву при відпрацюванні покладу камерними системами розробки з закладкою камер відходами гірничого виробництва / Гірний вісник: зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2019. Вип. 105. С. 3–8.

35. Калініченко О.В. Удосконалення системи підповерхового обвалення залізної руди на шахті «Родіна» з похилою формою стелени підсїчної камери на глибинах понад 1300 м / Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць. Рівне, 2019. Вип. 3(87). С. 84 – 95.

36. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O. The resource-saving technology of mining complex structured iron ore deposits / Traditions and innovations of resource-saving technologies in mineral mining and processing: Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2019. P. 4 – 21.

37. Ступнік М.І., Письменний С.В., Федько М.Б., Калініченко О.В. Підвищення стійкості очисних камер при відпрацюванні залізних руд Криворізького басейну / Геотехнічна механіка: міжвідомчий збірник наукових праць. Дніпро, 2018. Вип. 139. С.59–69.

38. Stupnik N.I., Kalinichenko V.A., Fedko M.B., Kalinichenko E.V. Possible use of uranium ores bucket hoisting in “Glavnyi” shaft of Novokonstantinovskaya underground mine at SE “VostGOK”: Multi-authored monograph. Petroșani, Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2019. P.6–18.

39. Пат. 114837 (Патентоздатний) Україна, МПК E21F 15/00, E21C 41/16. Спосіб відпрацювання рудного покладу із закладкою відкритого очисного простору / Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Кривенко Ю.Ю.; заявл. 19.08.16; опубл. 27.03.17. Бюл. №6.

40. Пат. 118117 (Патентоздатний) Україна, МПК E21C 41/16. Спосіб розробки крутоспадних потужних рудних покладів / Ступнік М.І., Калініченко В.О., Федько М.Б., Калініченко О.В., Хівренко О.Я.; заявл. 23.01.17; опубл. 25.07.17. Бюл. №14.

41. Новак А. І., Калініченко О.В., Заєць В. В., Васильчук О. Ю., Семенюк В. В.. Технологія підземної розробки корисних копалин / Навчальний посібник. Т38. Рівне : НУВГП, 2019. 315 с.

### **Статті та тези в виданнях конференцій**

42. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Чухарев С.М., Калініченко О.В. Зниження втрат і збіднення руди при відпрацюванні рудних тіл / Актуальні

проблемы современной науки: Материалы Международной научно-практической конференции. Москва-Будапешт-Вена, 2015. С. 33–37, (заочна участь).

43. Чухарев С.М., Плужник Ю.А., Калініченко О.В. Перспективи підземної розробки у Криворізькому залізрудному басейні / Перспективи розвитку сучасної науки: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Київ: МЦНД, 2015 р.). С. 53, (заочна участь).

44. Калініченко О.В., Грищенко Т.С., Грищенко М.А. Використання технології підземного збагачення залізних руд та закладки виробленого простору хвостами збагачення / Матеріали науково-технічної інтернет-конференції "Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі". Кривий Ріг, 2017. С. 136-137, (очна участь).

45. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Письменний С.В., Калініченко О.В., Письменна Т.Г. Дослідження впливу підземних гірничих робіт на відчуження земельних ділянок в умовах шахти «Тернівська» ПАТ «Кривбасзалізрудком» / International Conference «Innovative technologies in science and education. European experience». Vienna, Austria, 2017. P.327-335, (заочна участь).

46. Ступнік М., Калініченко О. Дослідження та удосконалення процесу випуску відбитої руди в блоках с трапецієподібним днищем / Школа підземної розробки: Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпро, 2018. С.116, (очна участь).

47. Калиниченко Е.В. Исследование влияния техногенного поля напряжений на развитие геомеханических процессов при формировании искусственных подземных сооружений / Материалы 16-й Международной научно-технической конференции (71-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). Минск: БНТУ, 2018. С.424, (заочна участь).

48. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Федько М.Б., Калініченко О.В. Дослідження впливу на міцність уранових руд реагентів, які застосовують при їх підземному блоковому вилуговуванні / Матеріали науково-технічної інтернет-конференції "Розвиток промисловості та суспільства". Кривий Ріг, 2018. С. 51-55, (очна участь).

### Патенти України

49. Пат. 109836 (Патентоздатний) Україна, МПК E21C 41/16. Спосіб розробки крутоспадних рудних покладів із застосуванням самохідної техніки / Ступнік М.І., Калініченко В.О., Хівренко О.Я., Федько М.Б., Калініченко О.В., Грищенко М.А., Теляпньов В.О.; заявл. 12.03.16; опубл. 12.09.16, Бюл. №17.

50. Пат. 48630 А Україна, МКИ E 21 C 41/00. Спосіб розробки рудних покладів / Калініченко В.О., Калініченко О.В.; заявл. 26.10.01; опубл. 15.08.02, Бюл. №8.

51. Пат. 105304 Україна, МПК E21C 41/00. Комбінований спосіб доставки рудної маси при підземній розробці крутоспадних потужних рудних покладів / Ступнік М.І., Калініченко В.О., Кривенко Ю.Ю., Калініченко О.В., Косенко А.В., Ковбик К.М.; заявл. 01.10.15; опубл. 10.03.16, Бюл. №5.

52. Пат. 105305 Україна, МПК E21C 41/00. Комбінований спосіб доставки рудної маси при підземній розробці крутоспадних потужних рудних покладів / Ступнік М.І., Калініченко В.О., Кривенко Ю.Ю., Калініченко О.В., Косенко А.В., Грищенко М.А.; заявл. 01.10.15; опубл. 10.03.16, Бюл. №5.

53. Пат. 106516 Україна, МПК E21C 41/00. Спосіб розробки похилих та крутоспадних родовищ корисних копалин камерними системами / Ступнік М.І., Кушнерьов І.П., Калініченко В.О., Кривенко Ю.Ю., Калініченко О.В., Грищенко М.А.; заявл. 13.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. №8.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (ДВНЗ «Криворізький національний університет», травень 2011–2016 рр.), (очна участь); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми сучасної науки» (Москва-Будапешт-Відень, 27 березня 2015 р.), (заочна участь); Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку сучасної науки» (м. Київ, 24–25 червня 2015 р.), (заочна участь); Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки» (м. Київ, 19–20 листопада 2015 р.), (заочна участь); Міжнародній науково-технічній Інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» (м. Кривий Ріг, ДВНЗ «КНУ», 14 грудня 2016 р.), (очна участь); Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 24–26 травня 2017 р.), (очна участь); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Школа підземної розробки» (м. Дніпропетровськ, НГУ, 2018 р.), (очна участь); Международной научно-технической конференции (71-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ). Минск, БНТУ, 2018 р., (заочна участь).

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень науково-технічної проблеми в цілому реалізовано в науково-дослідних роботах, які опубліковані автором особисто [7, 8, 10, 15, 19, 28, 30–32, 35, 47]. У цих роботах здобувач навів результати досліджень напружено-деформованого стану масиву при формуванні підземних виробок. У роботах [1, 4, 21–23, 27, 33, 38, 40], надрукованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у виконанні аналізу та науковому обґрунтуванні параметрів технології підземної розробки, в той час як в роботах [9, 16, 17, 20] автор вибрав та обґрунтував критерії моделювання гірського та штучного закладного масиву. В роботах [5, 11, 12] розроблено наукові основи управління напружено-деформованим станом масиву в підземних умовах рудних шахт, а в роботах [6, 13, 14, 18, 25, 26, 37] виконано розрахунок величини максимальних напружень у міжповерхових ціликах залежно від форми стелини, глибини розробки, міцності руд, кута нахилу, відносного радіуса кривизни стелини. У працях [24, 34, 39] особистий внесок здобувача полягає в розробленні технології комбінованого закладання виробленого простору, а в роботі [29] встановлено закономірності зміни величини втрат руди у відпрацьованих блоках. В роботах [2, 3] досліджено

вплив діяльності гірничодобувних підприємств на геомеханічний стан гірського масиву та виконано економічне оцінювання геомеханічних ризиків.

## АНОТАЦІЯ

**Калініченко О.В. Розвиток наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву при формуванні підземних виробок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин. – Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена розв'язанню проблеми розвитку наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву за рахунок уточнення закономірностей взаємодії полів напружень при формуванні підземних виробок.

Визначено фундаментальні закономірності й встановлено ключові залежності трансформації напружено-деформованого стану масиву на прикладі впливу відкритого очисного простору 40 відпрацьованих камер тривалого консервування шахти «Гігант-Глибока».

Установлено універсальні адаптивні показники величини максимальних напружень у горизонтальних, шатрових, склепистих і похилих стелинах очисних камер залежно від глибини розробки, кута нахилу та кривизни стелини, а також диференційованої міцності залізних руд.

Доведено, що при відпрацюванні багатих залізних руд на великих глибинах системами підповерхового обвалення необхідно використовувати вертикальні й похилі компенсаційні камери. При відпрацюванні багатих залізних руд камерними системами розробки на глибинах понад 1500 м ключовою вимогою є перехід на шатрові та склепоподібні стелини, які забезпечують максимальну стійкість в умовах високого гірського тиску.

Обґрунтовано доцільність упровадження високоефективної екологічно безпечної «каркасно-модульної» технології з комбінованим закладенням відпрацьованих камер. Розроблено прогресивну технологію випуску відбитої руди в блоках другої черги на контакті із закладним масивом камер першої черги, що дозволяє збільшити видобування руди з блока. Розроблено технологічні схеми відпрацювання ділянки шахтного поля з трапецієподібною формою основи блоків і комбінованим закладенням камер. Сформульовано теоретичні основи й розроблено методику визначення економічних ризиків від можливих порушень земної поверхні в результаті підземного видобутку залізних руд і магнетитових кварцитів.

Результати досліджень реалізовано шляхом розроблення методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в умовах ПрАТ «Євраз Суха Балка»; методичних рекомендацій «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в умовах родовища шахти

«Родіна» ПАТ «Кривбасзалізрудком»; «Інструкції з визначення безпечних та стійких параметрів очисних блоків на шахтах ДП «СхідГЗК»; використанням результатів дисертаційної роботи ДП ДПІ «Кривбаспроект» при розробленні гірничих проектів для шахт Криворізького залізрудного басейну; Стандарту підприємства (СТП) «Методика расчета удельных норм расхода основных материальных ресурсов подземного горнодобывающего комплекса ГП «ВостГОК»; Стандарту підприємства (СТП) «Нормы расхода основных материалов на ведение горных работ в условиях шахтоуправления при подземной добыче руды (на правах шахт) горного департамента ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

**Ключові слова:** підземна розробка, напружено-деформований стан, багаті залізні руди, магнетитові кварцити, уранові руди, випуск руди, закладка, технологічні схеми.

## АННОТАЦИЯ

**Калиниченко Е.В. Развитие научных основ управления напряженно-деформированным состоянием массива при формировании подземных выработок. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.02 – подземная разработка месторождений полезных ископаемых. Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2020.

Диссертация посвящена решению проблемы развития научных основ управления напряженно-деформированным состоянием массива за счет уточнения закономерностей взаимодействия полей напряжений при формировании подземных выработок.

Определены фундаментальные закономерности и установлены ключевые зависимости трансформации напряженно-деформированного состояния массива на примере воздействия открытого очистного пространства 40 отработанных камер длительного консервирования шахты «Гигант-Глубокая».

Установлены универсальные адаптивные показатели величины максимальных напряжений в горизонтальных, шатровых, сводообразных и наклонных потолочинах очистных камер в зависимости от глубины разработки, угла наклона и кривизны потолочины, а также дифференцированной крепости железных руд. Доказано, что при отработке богатых железных руд на больших глубинах системами поэтажного обрушения необходимо использовать вертикальные и наклонные компенсационные камеры. При отработке богатых железных руд камерными системами разработки на глубинах более 1500 м ключевым требованием является переход на шатровые и сводообразные потолочины, которые обеспечивают максимальную устойчивость в условиях высокого горного давления.

Обоснована целесообразность внедрения высокоэффективной экологически безопасной «каркасно-модульной» технологии с комбинированной закладкой отработанных камер. Разработана прогрессивная технология выпуска отбитой руды в блоках второй очереди на контакте с



закладочным массивом камер первой очереди, что позволяет увеличить извлечение руды из блока. Разработаны технологические схемы отработки участка шахтного поля с трапециевидной формой основания блоков и комбинированной закладкой камер. Сформулированы теоретические основы и разработана методика определения экономических рисков от возможных нарушений земной поверхности в результате подземной добычи железных руд и магнетитовых кварцитов.

Результаты исследований реализованы путем разработки методических рекомендаций «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в условиях ЧАО «Евраз Суха Балка»; методических рекомендаций «Выбор и обоснование устойчивых форм потолочин при добыче железных руд на больших глубинах» в условиях месторождения шахты «Родина» ПАО «Кривбассжелезрудком»; «Инструкции по определению безопасных и устойчивых параметров очистных блоков на шахтах ГП «ВостГОК»; использованием результатов диссертационной работы ГП ГПИ «Кривбасспроект» при разработке горных проектов для шахт Криворожского железорудного бассейна; Стандарта предприятия (СТП) «Методика расчета удельных норм расхода основных материальных ресурсов подземного горнодобывающего комплекса ГП «ВостГОК»; Стандарта предприятия (СТП) «Нормы расхода основных материалов на ведение горных работ в условиях шахтоуправления по подземной добыче руды (на правах шахт) горного департамента ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

**Ключевые слова:** подземная разработка, напряженно-деформированное состояние, богатые железные руды, магнетитовые кварциты, урановые руды, выпуск руды, закладка, технологические схемы.

## THE SUMMARY

**Kalinichenko O.V. Development of scientific principles of controlling the stress-strain state of the massif in forming underground workings. – Qualifying scientific work as a manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science on a speciality 05.15.02 – underground development of deposits of minerals. – Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2020.

Dissertation is devoted to solving the problems of development of scientific bases of control of stress-deformed state of the array by specifying the interaction of stress fields regularities in the formation of artificial underground structures.

We propose a method that allows to predict the probability of formation of sinkholes collapse and its parameters over the open underground mining production areas.

A system of elastic-plastic deformation of medium equations for calculation of stress-strain state of the rock mass, and the system functions, which determines the components of the tensors of stresses and strains in view of the laws of nonlinear continuum mechanics of rocks. «Giant-Gliboka» define the fundamental laws and set

the key depending on the transformation of the stress-strain state of the example of the impact of the open space of the cleaning chamber 40 waste prolonged preservation of the mine.

Established universal adaptive performance values of maximum stress in horizontal, tent, and inclined svodoobraznyh potolochinah treatment chambers, depending on the development of depth, inclination and curvature potolochiny and differentiated strength of iron ore. It is proved that when developing rich iron ore at greater depths sublevel caving systems need to use vertical and inclined compensating chamber. In developing the rich iron ore development chamber systems at depths greater than 1,500 m key requirement is to move on tent and svodoobraznye potolochiny that provide maximum stability under high rock pressure.

The expediency of the introduction of high-performance environmentally friendly «frame-modular» technology combined with the laying of the exhaust chamber, providing decrease in the amount of deformation in the 77–81 % while reducing the cost of the identity of stowing operations at 43–54 % compared to a hardening bookmark.

It is proved that for security monitoring ground surface within the mining allotment of mines, industrial and municipal facilities expedient to create a single data center surveying monitoring and geo-information centers on the subject of economic activity. This structure will ensure effective collection of relevant spatial information on the study area and create conditions for effective and qualitative solutions of strategic and operational objectives of safe operation of underground mines and the basin as a whole.

A progressive release technology broken ore in blocks II pending contact with the filling mass chambers I queue, thus increasing the extraction of ore from the unit. The technological scheme of mining mine field area with trapezoidal base units and a combined tab cameras. Formulated the theoretical basis and the method of determining the economic risks from the possible violations of the earth's surface due to underground mining of iron ore.

The investigation results are implemented through development of methodological recommendations “Selection and substantiation of stable crown shapes when mining iron ores at great depths at the deposit of *Rodina* underground mine of the PJSC *Kryvbaszalizrudkom*”; “Rules and regulations of determining safe and stable parameters of stopes at the underground mines of *VostGOK*”; application of the results by the State Enterprise “State Institute for Design of Mining Enterprises *Kryvbasproekt*” to develop mining projects for Kryvbas underground mines; the Enterprise Standard “Methods of calculating specific rates of consuming basic material resources at the underground mining complex *VostGOK*”; the Enterprise Standard “Rates of consuming basic material resources for underground mining operations at the underground mine group (as underground mines) of the mining department of ArcelorMittal Krivoy Rog”.

**Keywords:** underground mining, the stress-strain state, rich in iron ore, quartzite magnetite, uranium ore, ore release, tab, technological schemes.

Калініченко Олена Всеволодівна

**Розвиток наукових основ управління напружено-деформованим  
станом масиву при формуванні підземних виробок**

*Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук*

Формат 60x84/16. Ум. др. арк. – 1,9. Авт. арк. – 1,9.  
Тираж – 100 прим.

Друкарня СПД Щербенок С. Г.  
Свідоцтво ДП 126-р від 00.00.2017.  
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027