

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

КОНОНЕНКО МАКСИМ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 622.235: 622.06

**ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ ВИДОБУВАННІ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН**

Спеціальності: 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка»
05.15.04 – «Шахтне та підземне будівництво»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2022

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу механіки гірських порід Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпро)

**ПАЛАМАРЧУК
Тетяна
Андріївна**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортної інфраструктури Українського державного університету науки і технологій Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро)

**ПЕТРЕНКО
Володимир
Дмитрович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**ГАЙКО
Геннадій
Іванович**

Захист відбудеться «11» листопада 2022 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

Реферат розіслано «07» жовтня 2022 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**



Олександр СОЛОДЯНКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування теми дослідження. Україна володіє 10-ю частиною світових запасів залізних руд, з яких третина – це сучасний об'єм видобутку. Підземна розробка залізних руд у повному обсязі реалізується буропідривними роботами (БПР) із застосуванням промислових вибухових речовин (ПВР), з яких на сьогодні 58% – це емульсійні. Впровадження емульсійних вибухових речовин (ЕВР), розпочате у 2009 році, розкрило недосконалість існуючих методик визначення параметрів БПР. Методики, що офіційно діють у галузі з 80-х років минулого століття, не враховують фізико-хімічні особливості та детонаційні характеристики ЕВР, тріщинуватість порід та їх ущільнення під дією гірського тиску та вибуху. Це призводить до використання некоректних параметрів БПР із зниженням їх ефективності.

Під терміном підземна інфраструктура шахти розуміють мережу підземних гірничих виробок, до якої відносяться всі розкривальні, підготовчо-нарізні та очисні виробки з розташованими в них обладнанням та комунікаціями, що забезпечують доступ до корисної копалини та її видобування. Дослідники з України, Польщі, Сербії, Німеччини, Швеції, Китаю, США, Австралії та інших країн дослідили механізм руйнування порід вибухом та запропонували виробничникам значну кількість методик розрахунку параметрів БПР для проведення виробок і відбивання масиву. Однак, більшість з цих методик має емпіричну основу, яка ґрунтується на використанні поправних коефіцієнтів, а меншість – аналітичну, що базується на визначенні зон руйнування масиву.

Всі означені методики не розглядають зону інтенсивного подрібнення, радіус якої є вирішальним при визначенні суттєвої характеристики – лінії найменшого опору (ЛНО). Тому, при визначенні розмірів зон, що утворюються навколо заряду під дією вибуху, необхідне врахування окрім діаметру зарядної порожнини (шпур або свердловина), детонаційних характеристик вибухових речовин (ВР) та міцності порід, ще їх тріщинуватість, ущільнення під дією гірського тиску та вибуху і діаметр самого заряду ВР. Не врахування цих показників при визначенні ЛНО для шпурів і свердловин є некоректним, що збільшує витрати на проведення виробок до 18%, а на відбивання масиву до 50%. Окрім того, для зберігання рівномірної швидкості детонації у наливних ЕВР, потрібне врахування зміни густини за довжиною заряду та її контроль відносно критичної величини.

Отже необхідність геомеханічного обґрунтування параметрів, що суттєво підвищують ефективність створення підземної інфраструктури при видобуванні руд із застосуванням ЕВР, шляхом параметризації зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення у масиві порід є актуальною науково-технічною *проблемою*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року, що затверджена Законом України № 3268-VI від 21.04.2011. Також дисертація пов'язана з координаційними планами Міністерства освіти і науки України за фундаментальним напрямком «Гірничі науки» на 2000 – 2020 рр. та з планами держбюджетних робіт за темами «Фундаментальні основи видобування, переробки та оцінки об'єктів надр з каменесамодіювальною сировиною»

(ДР 0111U002811, 2011 – 2013 рр.); «Обґрунтування комплексу геотехнологічних модулів з використанням природно-техногенного ресурсу родовищ корисних копалин України» (ДР 0115U002300, 2015 – 2016 рр.); «Обґрунтування новітніх технологічних рішень освоєння родовищ корисних копалин у контексті сталого розвитку гірничодобувних регіонів» (ДР 0120U102078, 2020 – 2022 рр.).

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження – геомеханічне обґрунтування параметрів підземної інфраструктури при видобуванні залізної руди із застосуванням ЕВР на підставі встановлених закономірностей параметрів зон руйнування масиву навколо зарядної порожнини у залежності від властивостей ВР, динаміки вибуху та зміни показників гірського масиву у просторі.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення наступних завдань дослідження:

1. Виявити з використанням математичного моделювання закономірності утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються в масиві порід навколо зарядної порожнини під дією енергії вибуху ЕВР.

2. Виконати скінченно-елементний аналіз руйнування масиву гірських порід навколо зарядної порожнини та встановити закономірності зміни радіусів зон зминання та подрібнення в залежності від фізико-механічних властивостей породного масиву і тиску продуктів вибуху.

3. Змоделювати за допомогою скінченно-елементного методу параметри воронки викиду та виявити особливості зміни ЛНО в залежності від діаметру зарядної порожнини, тиску продуктів вибуху і міцнісних характеристик породного масиву.

4. Дослідити зміну густини ЕВР за довжиною заряду спираючись на закони гідростатики та газової динаміки й встановити експериментальні закономірності зміни швидкості детонації ЕВР у залежності від її густини та діаметру зарядної порожнини, а також визначити працездатність ПВР.

5. Обґрунтувати доцільні параметри БПР при проведенні підготовчо-нарізних виробок за працездатністю ВР, радіусами зон зминання та інтенсивного подрібнення гірських порід.

6. Обґрунтувати технологічні параметри БПР при відбиванні масиву за працездатністю ВР, радіусом зони інтенсивного подрібнення та кондиційного куска руди.

7. Визначити економічну ефективність видобування руд із використанням розроблених методик розрахунку параметрів БПР і провести екологічну оцінку стану атмосферного повітря при використанні ЕВР.

Ідея роботи полягає у використанні встановлених нових закономірностей радіусів зон руйнування масиву навколо заряду, що комплексно враховують фізико-механічні властивості порід та характеристики ЕВР, для геомеханічного обґрунтування параметрів створення підземної інфраструктури при видобуванні залізної руди.

Об'єкт дослідження – процес руйнування масиву порід із застосуванням ЕВР для створення підземної інфраструктури при підземній розробці залізрудних родовищ.

Предмет дослідження – закономірності формування радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення породного масиву навколо заряду залежно від його фізико-механічних властивостей та характеристик ЕВР.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань було використано системний підхід, що включав аналіз результатів науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт із застосуванням БПР при підземному видобуванні руд з використанням ПВР, аналіз параметрів та методик розрахунку технології БПР при проведенні гірничих виробок і відбиванні масиву, існуючих уявлень щодо механізму руйнування порід вибухом і теоретичних підходів визначення зон деформації масиву навколо заряду, а також аналітичне та комп'ютерне моделювання й натурні експерименти. Аналітичні дослідження виконані на основі фундаментальних положень механіки твердого тіла, а комп'ютерне моделювання з використанням скінченно-елементного аналізу, в натурних експериментах використаний реостатний метод.

Достовірність отриманих результатів і висновків підтверджується застосуванням апробованих методів дослідження, задовільним співпаданням результатів теоретичних та емпіріоаналітичних досліджень параметрів зон руйнування масиву порід (92 – 98%); високою збіжністю аналітичних досліджень та чисельного моделювання радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення (92 – 96%) і натурних експериментів з вимірювання швидкості детонації ЕВР (95%); апробацією розроблених методик на реальних об'єктах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше:

– обґрунтовані аналітичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються у масиві порід навколо заряду при вибуховому навантаженні, які комплексно враховують діаметри зарядної порожнини та заряду ЕВР, детонаційні характеристики ВР, міцність порід, а також тріщиноватість і ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, що збільшує точність визначення області руйнування масиву на 48%;

– за законами гідростатики та газодинаміки визначено перерозподіл густини наливних ЕВР у зарядних порожнинах з різними кутами нахилу та встановлено закономірності зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною сформованої колонки заряду до 55 м у залежності від її початкової густини та кута нахилу свердловини у діапазоні від 0 до 90°;

– встановлено степеневі залежності зміни швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 від її густини та діаметру зарядної порожнини, що дозволило визначити раціональну початкову густину ЕВР Україніт-ПП-2 для відбивання масиву, яка дорівнює $800 - 1000 \text{ кг/м}^3$ і при цьому зберігається швидкість детонації за довжиною колонки заряду до 35 м при різних кутах нахилу свердловин;

– отримано залежність ЛНО шпуру від радіусу зони зминання, діаметру шпуру та діаметру самого заряду ВР, детонаційних характеристик ВР, межі міцності порід на стискання, їх тріщиноватості та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, що дозволило обґрунтувати параметри БПР при проведенні горизонтальних і похилих гірничих виробок з розміщенням груп шпурів за площами, які вони займають у вибої та їх розташуванням за відбійними контурами;

– встановлено залежність ЛНО свердловин від комплексних характеристик, що враховують радіус зони зминання, діаметр свердловини, щільність та

швидкість детонації ВР, межу міцності руди на стискання, її тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, що дозволило обґрунтувати параметри БПР для відбивання масиву за зоною інтенсивного подрібнення.

2. Набула подальшого розвитку

– аналітична модель зони зминання зі встановленням ступеню залежності показників ЛНО, що враховують її радіус, діаметр свердловини, щільність та швидкість детонації ВР, межу міцності руди на стискання, її тріщинуватість, ущільнення під дією гірського тиску та вибуху і розміру кондиційного куска руди;

– параметризація закономірностей зміни швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 в залежності від її густини та діаметру зарядної порожнини, що дозволило визначити коефіцієнт працездатності для ПВР, який комплексно враховує теплоту й об'єм продуктів вибуху, їхню густину (щільність) та швидкість детонації.

3. *Удосконалено* відому ступеню залежність визначення ЛНО свердловин для відбивання масиву через уточнення коефіцієнту відносної працездатності ПВР, що враховує ступінь реалізації швидкості детонації ВР.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Радіуси зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються при вибуховому руйнуванні гірського масиву, змінюються за ступеню залежністю від діаметру заряду ВР, тиску продуктів вибуху у зарядній порожнині, міцності порід на розтягання-стискання, коефіцієнтів структурного ослаблення та ущільнення, що підвищує точність оцінки параметрів руйнування гірського масиву до 48%.

2. Початкова густина наливної ЕВР Україніт-ПП-2 у сформованій колонці заряду змінюється під дією гідростатичного тиску за ступеню залежністю від її довжини та кута нахилу зарядної порожнини у діапазоні 0 – 90°, що дозволяє за зміною швидкості детонації визначити місце розташування патронів-бойовиків (П-Б) і запропонувати конструкції зарядів у свердловинах.

3. Розрахунок параметрів БПР при проведенні горизонтальних і похилих гірничих виробок з використанням ЕВР Україніт-ПП-2 базується на принципі розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибої виробки, та розташуванням їх за відбійними контурами, а ЛНО шпуру визначається радіусом зони інтенсивного подрібнення. Показники зон руйнування масиву є основою нової методики розрахунку параметрів БПР для проведення піднятєвих виробок методами шпурових і свердловинних зарядів.

4. Підвищення ефективності БПР зі зменшенням витрат на проведення виробок до 18%, а відбивання масиву порід до 50% досягається використанням ЛНО, що змінюється за ступеню залежністю від радіусу зони зминання, щільності та швидкості детонації ВР, діаметру шпуру або свердловини, межі міцності порід на стискання, їх тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, а при патронованій ВР ще й від діаметру заряду.

Наукове значення роботи полягає у встановлених нових закономірностях формування радіусів зон руйнування масиву навколо зарядної порожнини залежно від густини і швидкості детонації ЕВР, міцності порід, їх тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, що дозволило обґрунтувати параметри підземної інфраструктури при видобуванні залізної руди.

Практичне значення роботи:

1. Методика розрахунку густини наливних ЕВР за довжиною заряду під дією гідростатичного тиску при різних кутах нахилу висхідних і низхідних свердловин і створено програму-калькулятор «Густина та швидкість детонації», яка дозволяє розрахувати густину та швидкість детонації вздовж колонки заряду для наливної ЕВР Україніт-ПП-2.

2. Методика розрахунку коефіцієнту відносної працездатності ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації.

3. Нова методика розрахунку параметрів БПР при проведенні виробок, в основу якої закладено принцип розміщення груп шпурів за площами, розташування шпурів – за відбійними контурами, а ЛНО шпурів – за радіусом зони інтенсивного подрібнення.

4. Комп'ютерна програма побудови паспорту БПР «Україніт – проходка», яка повністю автоматизує процес розрахунку, побудови та формування паспорту при проведенні виробок прямокутно-склепінчастої, аркової та прямокутної форм.

5. Удосконалена галузева методика розрахунку параметрів БПР для відбивання масиву шляхом уточнення коефіцієнту працездатності ПВР із врахуванням ступеня реалізації швидкості детонації.

6. Методики розрахунку параметрів розташування свердловин за радіусом зони інтенсивного подрібнення та розміру кондиційного куска руди.

7. Рекомендації щодо раціональних місць розташування П-Б і розроблено конструкції зарядів ЕВР для висхідних і низхідних свердловин за зміною густини та швидкості детонації вздовж заряду наливної ЕВР з використанням прямого, зворотного, прямого з дублюванням та зустрічного ініціювання.

8. Технологічні схеми відбивання руди за допомогою низхідних віял свердловин із застосуванням ЕВР для покладів руди потужністю понад 5 м.

9. Комп'ютерна програма побудови проекту на підсікання запасів у блоці «Україніт – підсічка», що автоматизує процес розрахунку, побудови та формування воронки або траншей.

10. Результати дослідження використано у навчальному процесі шляхом видання 3-х довідників і 2-х навчальних посібників, 2-х підручників, а також 9-ти матеріалів методичного забезпечення.

Реалізація результатів дослідження:

1. Спосіб розробки запасів на рудниках «Гурванбулаг» і «Дорнод» використано у ДУЕК «Мон-Атом» (Улан-Батор, рекомендації від 10.09.2013 і 25.10.2013, відповідно).

2. Спосіб збереження стійкості нарізних виробок при поверхово-камерних системах розробки впроваджено на шахтах АТ «КЗРК» (Кривий Ріг, рекомендації від 14.10.2012).

3. Обґрунтування параметрів БПР при відбиванні руди здійснено для умов шахт ПрАТ «Суша Балка» (Кривий Ріг, рекомендації від 10.03.2020).

4. Розроблений програмний продукт «Густина та швидкість детонації» (Density and speed detonation «DSD») з розрахунку густини та швидкості детонації за довжиною колонки заряду при заряджанні свердловин з різним кутом нахилу наливною ЕВР Україніт-ПП-2 використано у ТОВ «ЕККОМ» (Дніпро, акт впровадження від 16.11.2020).

5. Контроль густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2Б за довжиною заряду при заряджанні висхідних і низхідних свердловин прийнятий у ТОВ «ЕККОМ», (Дніпро, рекомендації від 25.05.2021).

6. Параметри БПР при проведенні підготовчих і нарізних виробок прийняті для умов шахт ПрАТ «ЗЗРК» (Дніпрорудне, рекомендації від 26.05.2021).

7. Конструкції зарядів ЕВР Україніт-ПП-2Б при заряджанні висхідних і низхідних свердловин впроваджено у ТОВ «ІСТ-ФОРТ», (Харків, рекомендації від 01.07.2021).

8. Наливна ЕВР Україніт-ПП-2 при видобуванні руд використана на шахтах ПрАТ «Суша Балка» (Харків, акт впровадження від 30.12.2021).

9. Навчальні програми підготовки бакалаврів і магістрів з дисциплін «Особливості підземної розробки рудних родовищ», «Гірничі машини для підземної розробки рудних родовищ», «Вибухові роботи», «Процеси підземної розробки рудних родовищ», «Технологія підземної розробки рудних родовищ», «Проектування рудних шахт» та «Цифрові технології при руйнуванні геоматеріалів вибухом» впроваджені у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (Дніпро, 2010 – 2022 рр.).

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні наукової проблеми, постановці мети та формулюванні завдань дослідження, розробці методики дослідження, проведенні натурних експериментів, аналітичного та чисельного комп'ютерного моделювання, обробки і оцінки отриманих результатів, формулюванні наукових положень, апробації результатів досліджень на наукових конференціях і технічних нарадах, а також впровадженні технологічних рішень.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях: «Форум гірників» (Дніпро, 2011), «Школа підземної розробки» (Бердянськ, 2012, 2016, 2018), «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» (Кривий Ріг, 2016), «Energy efficiency and energy saving» (Дніпро, 2017), «Physical & Chemical Geotechnologies» (Дніпро, 2018, 2020, 2021), «XX Українська конференція з неорганічної хімії» (Дніпро, 2018), «Жер койнауын игерудің ресурстық-репродукциялық, аз қалдықты және экологиялық технологиялары» (Актау, 2018), «Український гірничий форум» (Дніпро, 2021), і технічних нарадах АТ «КЗРК» (Кривий Ріг, 2012 – 2019), ПрАТ «Суша Балка» (Кривий Ріг, 2019 – 2020), ПрАТ «ЗЗРК» (Дніпрорудне, 2011 – 2021), ПрАТ «ЦГОК» (Кривий Ріг, 2020), ТОВ «ЕККОМ» (Дніпро, 2018 – 2021), ТОВ «ІСТ-ФОРТ» і ТОВ «Укрвибухтехнологія» (Харків, 2018 – 2021).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 54 друковані праці, з яких: 1 монографія, 18 статей у наукових фахових виданнях України та 3 у міжнародних рецензованих виданнях, 17 робіт у наукометричних базах Scopus і Web of Science, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 2 патенти на винаходи, 13 статей і тез доповідей у матеріалах конференцій, 2 посібника, 2 підручника і 3 довідника: з них 1 – за кордоном.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6-ти розділів, висновків; містить 79 рисунків, 55 таблиць, список використаних джерел з 275 найменувань на 25-ти сторінках і 2 додатки на 15-ти сторінках. Загальний обсяг роботи – 365 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами; сформульовано мету і поставлено завдання дослідження; описано ідею, об'єкт, предмет і методи дослідження; подано наукові положення, що виносяться на захист; зазначено наукову новизну отриманих результатів, їх обґрунтованість і достовірність, наукове та практичне значення роботи; розкрито реалізацію результатів роботи, а також особистий внесок автора, висвітлено апробацію роботи та публікації за напрямками досліджень.

Розділ 1. Аналіз об'єкту, предмету та наукової проблеми, формулювання мети та постановка завдань дослідження, присвячений оцінюванню об'єкта, предмета дослідження і рівня вивчення наукової проблеми, за якими сформульована мета та поставлені завдання дослідження. Аналіз гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов розробки залізородних родовищ, а також досвід підземного видобування руд буропідричним способом, дозволив встановити, що підземна розробка руд у повному обсязі реалізується БПР із застосуванням ПВР, з яких на сьогодні 58% – це емульсійні. Встановлено, що впровадження ЕВР, розпочате у 2009 році, розкрило недосконалість існуючих методик визначення параметрів БПР, як при проведенні гірничих виробок, так і при відбиванні руд, а також недостатню автоматизацію розрахунків при проектуванні БПР. Методики, що офіційно діють у галузі з 80-х років минулого століття, не враховують фізико-хімічні особливості та детонаційні характеристики ЕВР, тріщинуватість порід і їх ущільнення під дією гірського тиску та вибуху. Це призводить до використання некоректних параметрів БПР, що знижує технологічні та економічні показники.

Для оцінювання об'єкта дослідження виконано аналіз гіпотез механізму руйнування масиву гірських порід вибухом, що запропоновані Фроловим М.М., Боресковим М.М., Сухановим А.Ф., Лаврентьевим М.О., Кузнецовим В.М., Власовим О.Є., Демидюком Г.П., Беляєвим О.Ф., Садовським М.О., Мосинцем В.М., Аністратовим Ю.І., Покровським Г.І., Ржевським В.В., Мельниковим М.В., Ханукаєвим О.Н., Друкованим М.Ф., Баумом Ф.А., Бароном Л.І., Єфремовим Е.І., Kutter Н.К. та іншими. У результаті аналізу виокремлені сучасні погляди на дію вибуху у твердому середовищі, яким є спільна дія продуктів вибуху та хвиль напружень.

Для оцінки предмету дослідження виконано аналіз теорій до визначення величин радіусів зон, які утворюються навколо зарядної порожнини під дією вибуху, що запропоновані Мосинцем В.М., Горбачовою Н.П., Білоконом В.П., Ольховським А.К., Белоконем М.П., Друкованим М.Ф., Кравцовим В.С., Чернявським Ю.Є., Ревою В.В., Зерковим С.М., Ракішевим Б.Р., Єрофєєвим І.Є., Єфремовим Е.І., Петренком В.Д., Пастуховим А.І., Адушкіним В.В., Співаком О.О., Szuladzinski G., Kexin D., Крюковим Г.М., Андрієвським О.П., Кутузовим Б.М., Djordjevic N., Kanchibotla S.S., Valery W., Morrell S., Esen S., Onederra I., Chun-rui L., Li-jun K., Qing-xing Q., De-bing M., Quan-ming L., Gang X., Кузнецовим В.А., Iverson S.R., Hustulid W.A., Johnson J.C., Torbica S., Lapčević V. та іншими. Аналізом встановлено, що переважна більшість теорій має емпіричну основу та базується на різних закономірностях механізму руйнування масиву гірських порід вибухом і врахуванні властивостей тротиловісних ПВР без

детонаційних характеристик сучасних ЕВР. Також всі ці теорії не розглядають зону інтенсивного подрібнення, що є вирішальною при визначенні ЛНО.

Аналіз об'єкту і предмету дослідження, а також наукової проблеми, дозволив сформулювати мету та поставити завдання дисертаційної роботи, для вирішення яких у логічній схемі загальної методики досліджень виділено 17 взаємопов'язаних блоків. Базові 12 блоків відповідають поставленим завданням, а останні 5 відносяться до допоміжних, що пов'язані з підготовкою вихідних даних.

Розділ 2. Дослідження зон змінання та подрібнення масиву порід навколо зарядної порожнини, містить вирішення 1, 2 і 3-го наукових завдань. Спираючись на виконаний аналіз процесу руйнування гірських порід під дією вибуху, для вирішення першої задачі було проведено деталізацію зон, які утворюються навколо зарядної порожнини за деформацією та руйнуванням середовища (табл. 1). Це дозволило виділити чотири зони, які утворюються в масиві навколо зарядної порожнини – змінання (перша), інтенсивного подрібнення (друга), тріщиноутворення (третья) і сейсмічна (четверта).

Таблиця 1 – Деталізація зон, які утворюються навколо зарядної порожнини

Зона	Хвиля	Деформації	Руйнування
Перша	Ударна	Пластичні	Змінання
Друга	Напружень	Пружно-пластичні	Інтенсивного подрібнення
Третя			Тріщиноутворення
Четверта	Сейсмічна	Пружні	Стрясання

Згідно методики математичного моделювання розроблено параметричну схему до визначення зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що утворюються навколо зарядної порожнини при підірванні заряду ВР (рис. 1).

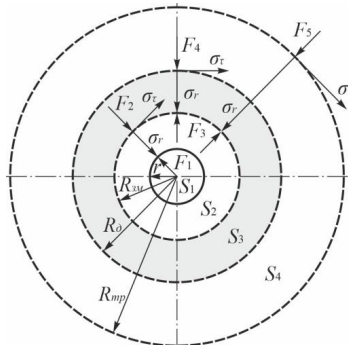


Рисунок 1 – Параметрична схема до визначення зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення: S_1, S_2, S_3, S_4 – площі зарядної порожнини та відповідних зон, м^2 ; F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 – діючі сили, Н; σ_r – радіальні напруження, Н/м^2 ; σ_t – тангенціальні напруження, Н/м^2 ; r – радіус зарядної порожнини, м; R_{zm} – радіус зони змінання, м; R_0 – радіус зони інтенсивного подрібнення, м; R_{mp} – радіус зони тріщиноутворення, м

Механічні напруження σ , що виникають в масиві порід під дією енергії вибуху для зони зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення відповідно є наступними

$$\sigma = \frac{P_1 \cdot r^2}{R_{3M}^2 - r^2}, \text{ Н/М}^2; \quad \sigma = \frac{P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_0^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/М}^2; \quad \sigma = \frac{P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_{mp}^2 - R_{3M}^2}, \text{ Н/М}^2, \quad (1, 2, 3)$$

де P_1 – тиск продуктів вибуху, з достатньою точністю визначається як

$$P_1 = \frac{\rho \cdot D^2}{8} \cdot K_{03}, \text{ Па}, \quad (4)$$

ρ – щільність (густина) ВР, кг/М^3 ; D – швидкість детонації ВР, м/с ; K_{03} – коефіцієнт, що враховує зміну тиску продуктів вибуху на стінки зарядної порожнини в залежності від діаметру заряду ВР

$$K_{03} = (d_3 / d)^3, \quad (5)$$

d_3 – діаметр заряду ВР, м ; d – діаметр зарядної порожнини, м ; P_2 – зниження тиску продуктів вибуху на масив за рахунок збільшення площі контакту

$$P_2 = (P_1 \cdot r) / R_{3M}, \text{ Па}. \quad (6)$$

Вирази (1) – (3) це рівняння задачі Ламе Г., згідно теорії, за якої у товстостінних циліндрах за умови дії тільки внутрішнього тиску, радіальні напруження σ_r у всіх точках циліндра будуть від'ємні (напруження стискання), а тангенціальні напруження σ_t – позитивні (напруження розтягання). Тобто напруження σ_r і σ_t це головні напруження.

Для визначення еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$ у об'ємному напруженому стані, використана Третя теорія міцності, яка добре підтверджена дослідями для матеріалів, що однаково реагують на розтягування та стискання, а також руйнуються шляхом зсуву. Головні напруження $\sigma_1 = \sigma_t = \sigma$; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = \sigma_r = -\sigma$. За Третьою теорією міцності, еквівалентне напруження дорівнює $\sigma_{екв} = \sigma_1 - \sigma_3$; або для зони зминання $\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_1 \cdot r^2}{R_{3M}^2 - r^2}$, Н/М^2 ; інтенсивного подрібнення – $\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_0^2 - R_{3M}^2}$, Н/М^2 ;

тріщиноутворення – $\sigma_{екв} = \frac{2 \cdot P_2 \cdot R_{3M}^2}{R_{mp}^2 - R_{3M}^2}$, Н/М^2 . При утворенні зон зминання та інтенсивного подрібнення виконується умова всебічного стискання $\sigma_{екв} = \sigma_{ст}$.

Як відомо з теорії пружності та пластичності, якщо зовнішній діаметр циліндра більше внутрішнього у 4 рази, а розрахунки припускають розбіжність до 6%, то в цьому випадку рішення не пов'язане з формою зовнішнього контуру, а циліндр знаходиться в умовах чистого зсуву. На підставі цього для зони тріщиноутворення умова має вигляд $\sigma_{екв} = \tau_3$. Ґрунтуючись вище наведеним і з урахуванням динамічного коефіцієнту при ударному навантаженні та виконавши необхідні перетворення отримано математичні вирази радіусів зон

– зминання

$$R_{3M} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{03}}{2 \cdot \sigma_{ст}}}, \text{ м}, \quad (7)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_o = R_{3m} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3m} \cdot \sigma_{cm}}}, \text{ м}; \quad (8)$$

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = R_{3m} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3m} \cdot \tau_3}}, \text{ м}, \quad (9)$$

де σ_{cm} – межа міцності порід на стискання, Па; τ_3 – межа міцності порід на зсув, Па.

Формули (7) – (9) визначають радіуси зон, які утворюються навколо зарядної порожнини з урахуванням діаметрів зарядної порожнини та заряду ВР, детонаційних характеристик ВР та межі міцності порід на стискання (у роботі врахована також межа міцності на розтягання). Недоліком цих формул є те, що вони не враховують початкову тріщинуватість масиву та ущільнення породи під дією гірського тиску. Тому для підвищення точності розрахунків радіусів вказаних зон у надані формули введено коефіцієнти структурного ослаблення масиву та ущільнення порід під дією гравітаційних сил (гірського тиску). За необхідних перетворень, отримано формули розрахунку радіусів зон

– змінання

$$R_{3m} = 0,5 \cdot d \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_{\partial 3}}{2 \cdot \sigma_{cm} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (10)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_o = R_{3m} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3m} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}; \quad (11)$$

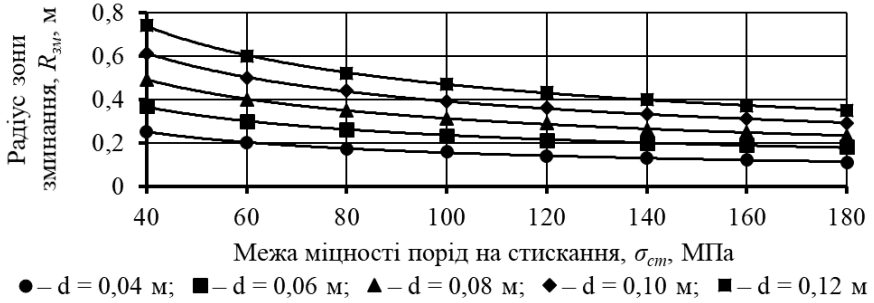
– тріщиноутворення

$$R_{mp} = R_{3m} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d \cdot K_{\partial 3}}{8 \cdot R_{3m} \cdot \tau_3 \cdot K_c \cdot K_y}}, \text{ м}, \quad (12)$$

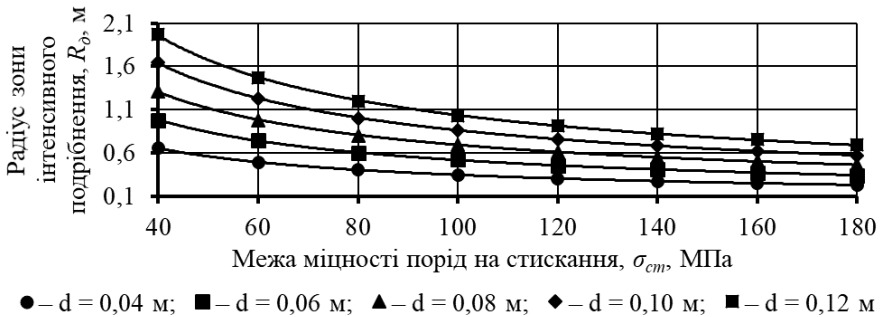
де K_c – коефіцієнт структурного ослаблення масиву; K_y – коефіцієнт ущільнення порід під дією гірського тиску $K_y = (\gamma + 0,1 \cdot H) / \gamma$; γ – щільність порід, кг/м³; H – глибина гірничих робіт, м.

Дослідження отриманих аналітичних моделей радіусів зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення виконане шляхом їх порівняння зі значеннями для крайових умов і розрахунків за відомими теоріями для підтвердження коректності. Вихідними даними для проведення дослідження моделей радіусів означених зон є: тиск продуктів вибуху – 1000, 1500 і 2000 МПа, межа міцності порід на стискання – 40 – 180 МПа та діаметр зарядної порожнини – 0,04, 0,06, 0,08, 0,10 та 0,12 м. У якості прикладу наведено зміну радіусів цих зон в залежності від діаметру зарядної порожнини та міцності порід, при тиску продуктів вибуху у 1500 МПа (рис. 2).

а



б



в

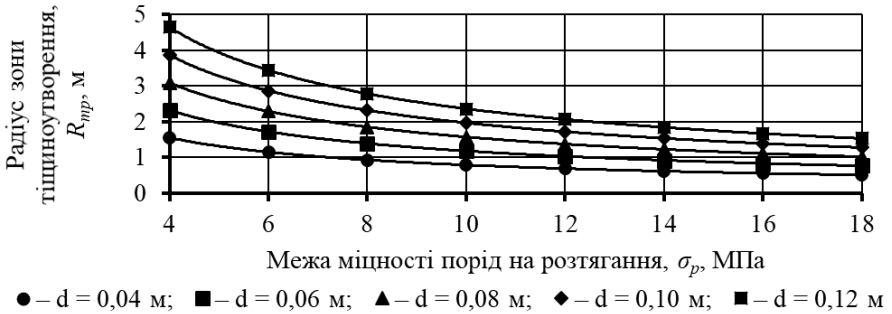
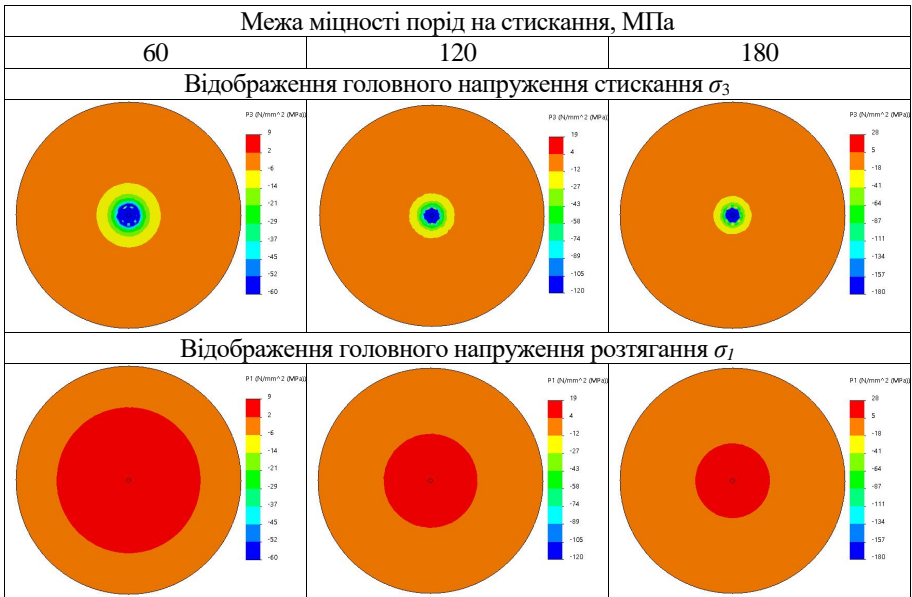


Рисунок 2 – Графіки залежності зміни радіусу зони змінання (а) інтенсивного подрібнення (б) та тріщиноутворення (в) від межі міцності порід на розтягання-стискання та діаметру зарядної порожнини при тиску продуктів вибуху у 1500 МПа

Порівнянням результатів досліджень аналітичних моделей радіусів зон у межах крайових умов за жорсткими теоретичними посиланнями встановлено розбіжність, яка не перевищує для зон змінання та тріщиноутворення – 2%, а для виявленої зони інтенсивного подрібнення – 8%, що вказує на високу достовірність результатів та коректність розроблених моделей.

Згідно 2-ї задачі, для визначення радіусів зон змінання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення за зміною напружено-деформованого стану порід під дією вибуху, виконаний скінченно-елементний аналіз (СЕА) руйнування масиву навколо зарядної порожнини за допомогою ліцензійного програмного забезпечення системи інженерного аналізу SolidWorks Simulation. Для проведення СЕА моделі руйнування масиву навколо зарядної порожнини, було сформовано вихідні дані: геометричні розміри моделі, середні значення фізико-механічних властивостей гірських порід за всіма залізородними шахтами України, граничні навантаження. У якості прикладу розглянуто відображення головного напруження стискання σ_3 та розтягання σ_1 моделі для порід з межею міцності на стискання 60, 120 та 180 МПа, при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м і тиску продуктів вибуху у 1000 МПа, що подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати СЕА руйнування масиву моделі при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м і тиску продуктів вибуху у 1000 МПа



За результатами СЕА руйнування масиву гірських порід навколо зарядної порожнини встановлено степеневі залежності зміни радіусів зон

– змінання

$$R_{3M} = 0,372 \cdot d \cdot \rho^{0,499} \cdot D^{0,998} \cdot \sigma_{cm}^{-0,501} \cdot K_{D3}^{0,499}, \text{ м}; \quad (13)$$

– інтенсивного подрібнення

$$R_D = 0,424 \cdot d \cdot \rho^{0,648} \cdot D^{1,296} \cdot \sigma_{cm}^{-0,651} \cdot K_{D3}^{0,648}, \text{ м}; \quad (14)$$

– тріщиноутворення

$$R_{mp} = 0,036 \cdot d \cdot \rho^{0,743} \cdot D^{1,486} \cdot \sigma_{cm}^{0,747} \cdot \tau_3^{-1,494} \cdot K_{D3}^{0,743}, \text{ м}. \quad (15)$$

Порівнянням результатів дослідження аналітичних оцінок радіусів цих зон з результатами чисельного моделювання встановлено розбіжність аналітичних параметрів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення – 4, 8 і 6%, відповідно. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність аналітичних моделей до визначення радіусів вказаних зон.

Зовнішня дія вибуху характеризується відношенням радіусу воронки викиду до ЛНО, що є важливим показником ефективності заряду. За даними практики ведення підричних робіт при проведенні підземних гірничих виробок і відбиванням масиву показник дії вибуху дорівнює 0,75, а кут при вершині конусу воронки викиду – 74° . Тому для вирішення 3-ї задачі проведено моделювання ЛНО через утворення воронки викиду при підриванні зарядів за допомогою програмного продукту SolidWorks Simulation. Обчислювальні експерименти проводили для різної межі міцності порід на розтягання, при різному діаметрі зарядної порожнини та тиску продуктів вибуху. На рис. 3 надані відображення головного напруження розтягання σ_1 моделі з межею міцності порід на стискання 60, 120 і 180 МПа, при діаметрі зарядної порожнини 0,04 м та тиску продуктів вибуху у 1000 МПа.

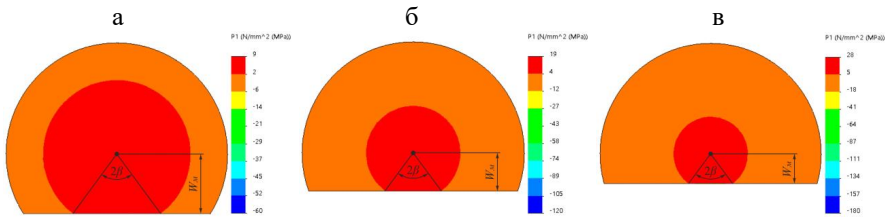


Рисунок 3 – Результати визначення ЛНО (W_m) за відображенням головного напруження розтягання σ_1 для моделі з межею міцності порід на стискання 60 (а), 120 (б) та 180 (в) МПа і куті при вершині воронки викиду 74° (2β)

За результатами чисельного моделювання визначена степенева залежність зміни ЛНО від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід на стискання та зсув

$$W_m = 0,0386 \cdot d \cdot \rho^{0,72} \cdot D^{1,44} \cdot \sigma_{cm}^{0,73} \cdot \tau_z^{-1,46} \cdot K_{Dz}^{0,72}, \text{ м.} \quad (16)$$

Подальшими дослідженнями з використанням тригонометричних функцій отримано вираз для розрахунку ЛНО за зоною тріщиноутворення

$$W_{mp} = R_{mp} \cdot \cos \beta, \text{ м,} \quad (17)$$

де β – половина кута при вершині конусу воронки викиду, що дорівнює 37° .

Згідно основних положень квазістатично-хвильової гіпотези дії вибуху у гірській породі, масив руйнується завдяки комбінованій дії тиску продуктів вибуху та хвилі напружень, тому для встановлення ЛНО використані розміри зони інтенсивного подрібнення. У цій зоні порода руйнується завдяки дії напружень стискання, які утворюються від тиску продуктів вибуху, що призводить до інтенсивного утворення тріщин.

Величина ЛНО з урахуванням площі зони інтенсивного подрібнення складає

$$W_0 = \sqrt{\pi} \cdot R_0, \text{ м.} \quad (18)$$

Порівнянням розрахунків за формулами (17) і (18) встановлена розбіжність у межах 1 – 9% з результатами моделювання, а порівнянням величини ЛНО за радіусами зон тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення визначено найбільш точну формулу розрахунку ЛНО, якою є залежність за зоною інтенсивного подрібнення.

Розділ 3. Дослідження детонаційних характеристик промислових вибухових речовин і визначення їх працездатності, стосується вирішення четвертого наукового завдання роботи. Аналізом технологічних схем ведення очисних робіт, встановлено, що для відбивання залізних руд на шахтах України використовується в'язлова схема розташування свердловин. Тому науково-прикладний інтерес представляє дослідження зміни густини та швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу, як висхідних, так і низхідних свердловин, який коливається у межах від -90° до $+90^\circ$. Максимальна швидкість детонації та відносна працездатність обраної ВР досягається при певній щільності заряджання. Особливо це стосується використання наливних ЕВР, в яких за довжиною заряду зростає гідростатичний тиск, що збільшує їх густину у нижній частині заряду за рахунок зменшення розмірів газових пор. За аналізом відомих законів гідростатики та газової динаміки розроблено розрахункову схему (рис. 4) та запропоновано методику розрахунку перерозподілу густини ЕВР у зарядних порожнинах з різними кутами нахилу.

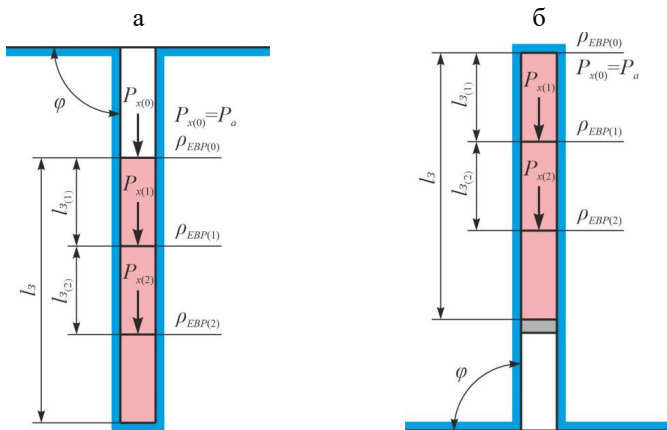


Рисунок 4 – Розрахункова схема до визначення густини ЕВР за довжиною сформованої колонки заряду в низхідних (а) і висхідних (б) зарядних порожнинах: P_a – атмосферний тиск, МПа; $P_{x(0)}$, $P_{x(1)}$, $P_{x(2)}$, ..., $P_{x(i)}$ – гідростатичний тиск, МПа; $\rho_{EBVP(0)}$, $\rho_{EBVP(1)}$, $\rho_{EBVP(2)}$, ..., $\rho_{EBVP(i)}$ – густина ЕВР у розрахунковій довжині Δl_i , кг/м³; $l_{z(1)}$, $l_{z(2)}$, ..., $l_{z(i)}$ – довжина колонки заряду при i -му гідростатичному тиску, м; l_3 – довжина колонки заряду ЕВР, м; φ – кут нахилу зарядної порожнини ($0 - 90^\circ$)

Для розрахунку густини ЕВР на певній глибині за довжиною сформованої колонки заряду у зарядній порожнині задається фіксоване значення гідростатичного тиску ΔP стовпа ЕВР довжиною Δl_i , що збільшує гідростатичний тиск $P_{x(i)}$.

Згідно розрахункової схеми (рис. 4), тиск при якому буде знаходитись шар у колонці ЕВР за довжиною заряду з урахуванням кута нахилу зарядної порожнини до горизонтальної площини

$$P_{x(i)} = P_{x(i-1)} + \Delta P \cdot \sin \varphi, \text{ МПа.} \quad (19)$$

Так, як ЕВР складається з флюїдів, що не змішуються, максимальну густину можна розрахувати через питомі об'єми, що займає кожен з них в ЕВР. З співвідношення густини емульсії (ρ_{EM}) та її величини при атмосферному тиску, питомий об'єм газових включень у ЕВР складе

$$V_{\Gamma(0)} = \frac{1}{\rho_{EBP(0)}} - \frac{1}{\rho_{EM}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (20)$$

де $\rho_{EBP(0)}$ – густина наливної ЕВР при атмосферному тиску, тобто густина ЕВР на виході зі шлангу зарядної машини, $\text{кг}/\text{м}^3$.

На шар ЕВР з розрахунковим кроком Δl_i за довжиною колонки заряду діє гідростатичний тиск $P_{x(i)}$, при цьому об'єм емульсії практично не змінюється ($V_{EM} \cong const$), а загальний об'єм газових включень зменшується до $V_{\Gamma(i-1)}$. Тоді згідно закону Бойля-Маріотта

$$V_{\Gamma(i)} = \frac{P_{x(i-1)} \cdot V_{\Gamma(i-1)}}{P_{x(i)}}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (21)$$

Не складно довести, що довжина шару ЕВР, у якому збільшиться гідростатичний тиск на фіксовану величину ΔP складе

$$\Delta l_i = \frac{\Delta P \cdot 10^6}{\rho_{cpEBP(i)} \cdot g}, \text{ м}, \quad (22)$$

де $\rho_{cpEBP(i)}$ – середня густина ЕВР у розрахунковій довжині Δl_i , $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

Довжина колонки заряду при гідростатичному тиску $P_{x(i)}$

$$l_{z(i)} = l_{z(i-1)} + \Delta l_i, \text{ м}. \quad (23)$$

Зміну густини за довжиною сформованої колонки заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2 з початковою густиною $950 \text{ кг}/\text{м}^3$, що сенсифілізована газовими порами, яку розміщено у зарядній порожнині з різними кутами нахилу показано на рис. 5.

Встановлено, що заряджання порожнин наливною ЕВР Україніт-ПП-2 із початковою густиною у межах $800 - 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$ дозволяє не перевищувати критичної густини, що дорівнює $1410 \text{ кг}/\text{м}^3$, та гарантувати протікання детонації вздовж заряду довжиною до 35 м . Подальшими дослідженнями отримана залежність для розрахунку густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною сформованої колонки заряду для різних кутів нахилу свердловин

$$\rho = \frac{\varphi^{0,635-0,0003 \cdot \rho_n} \cdot l_z}{(3,7 - 0,001 \cdot \rho_n)^{-1}} - \frac{\varphi^{0,835-0,0003 \cdot \rho_n} \cdot l_z^2}{100} + \frac{\varphi}{(1,43 - 0,0007 \cdot \rho_n)^{-1}} + \rho_n, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (24)$$

де ρ_n – початкова густина наливної ЕВР Україніт-ПП-2, $\text{кг}/\text{м}^3$.

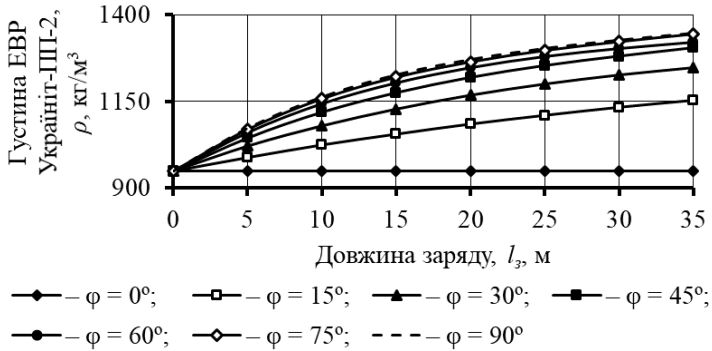


Рисунок 5 – Графіки залежності зміни густини наливної ЕВР України-ПП-2 за довжиною сформованої колонки заряду від кута нахилу зарядної порожнини (φ)

Дослідження зміни густини ЕВР України-ПП-2 у зарядній порожнині за довжиною заряду показало також її суттєвий вплив на величину швидкості детонації. Тому було проведено експериментальні дослідження з визначення швидкості детонації ЕВР в залежності від діаметру заряду та густини наливної ЕВР України-ПП-2.

Вимірювання швидкості детонації наливної ЕВР України-ПП-2 проводили в умовах випробувального полігону ПрАТ «Промвибух» (Запоріжжя). Для імітації зарядної порожнини використовували пластикові труби з внутрішнім діаметром 30, 40 і 100 мм і довжиною 0,5 м, у яких розміщували П-Б та заряд ЕВР. Визначення швидкості детонації проводили при різній густині ЕВР, що змінювалась від 850 до 1400 кг/м³. Так, як регістратор MicroTrap дозволяє фіксувати до чотирьох вимірів одночасно, то виконували 2 серії по 3 вибухи проб для різних діаметрів та густини ЕВР. За результатами експериментального дослідження було встановлено степеневі залежності зміни швидкості детонації від діаметру заряду та густини ЕВР. Для визначення швидкості детонації ЕВР України-ПП-2 при різній її густині та діаметрі заряду емпіричні залежності мають вид

– при густині ЕВР України-ПП-2 – $800 \leq \rho < 1300$ кг/м³

$$D = (4,8 \cdot \rho + 1926) \cdot d^{0,014\sqrt[3]{\rho}}, \text{ м/с}; \quad (25)$$

– при густині ЕВР України-ПП-2 – $1300 \leq \rho \leq 1400$ кг/м³

$$D = (70,6 \cdot \rho - 0,025 \cdot \rho^2 - 38665) d^{1,288 \ln(\rho) - 8,94}, \text{ м/с}. \quad (26)$$

Для встановлення раціональної початкової густини ЕВР України-ПП-2 при відбиванні масиву визначались зміни швидкості детонації за довжиною заряду при різних кутах нахилу свердловин за допомогою наведеної методики та отриманих формул (25) і (26). У якості прикладу приведено графіки зміни величини швидкості детонації наливної ЕВР України-ПП-2 з початковою густиною 950 кг/м³ та діаметром заряду 0,105 м при різних кутах нахилу свердловин (φ) (рис. 6.)

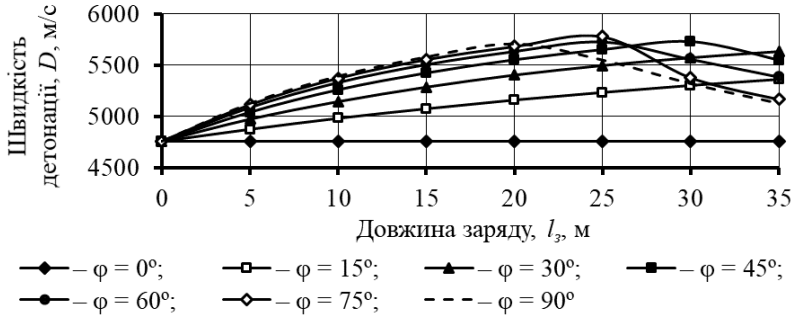


Рисунок 6 – Графіки зміни швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2

Дослідженнями швидкості детонації встановлено раціональну початкову густину наливної ЕВР Україніт-ПП-2 для відбивання масиву, яка дорівнює 800 – 1000 кг/м³ та при якій зберігається рівномірна швидкість детонації за довжиною сформованої колонки заряду до 35 м.

Отримані залежності стали підґрунтям для розробки та впровадження програмного продукту «Густина та швидкість детонації» (Density and Speed Detonation «DSD») з розрахунку густини та швидкості детонації вздовж сформованої колонки заряду для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 як у висхідних, так і у низхідних свердловинах з різними кутами їх нахилу.

Аналізом найбільш відомих методик розрахунку параметрів БПР при проведенні гірничих виробок і відбиванні масиву визначено, що у запропонованих розрахункових формулах ЛНО шпурових і свердловинних зарядів використовується коефіцієнт працездатності ВР. Оглядом існуючих методик розрахунку цього коефіцієнту встановлено, що цей коефіцієнт залежить від комбінації різних показників ВР за їх властивостями, що дає значні розбіжності в результатах розрахунку, а для ЕВР взагалі є суттєво заниженим. Тому було розроблено методику розрахунку коефіцієнту працездатності для всіх ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації, яка враховує енергетичні та детонаційні характеристики ВР, такі як теплота вибуху, об'єм продуктів вибуху, їх щільність і швидкість детонації. Коефіцієнт працездатності ВР розраховується за наступним співвідношенням

$$e = \frac{Q_E}{Q_{BP}}, \quad (27)$$

де Q_E і Q_{BP} – відповідно теплота вибуху 1 кг еталонної ВР (Амоніт № 6 ЖВ) та теплота вибуху 1 кг прийнятої ВР з урахуванням ступеня реалізації швидкості детонації, кДж/кг.

Коефіцієнт працездатності ВР за запропонованою методикою, враховує енергетичні та детонаційні характеристики ВР, а проектування параметрів БПР дозволяє отримати найбільш коректні результати.

Розділ 4. Обґрунтування параметрів буропідричних робіт при проведенні підготовчо-нарізних виробок, стосується вирішення п'ятого наукового завдання роботи, яке пов'язане з обґрунтуванням доцільних параметрів БПР при проведенні підготовчо-нарізних виробок. За результатами аналітичних досліджень та чисельного моделювання було розроблено нову методику розрахунку параметрів БПР для проведення горизонтальних і похилих гірничих виробок, в основу якої покладено принцип розміщення груп шпурів за площами, які вони займають у вибої виробки та розташування їх за відбійними контурами згідно схеми (рис. 7).

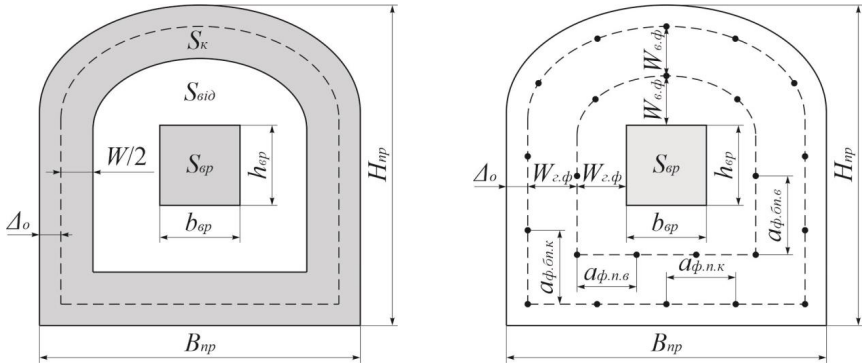


Рисунок 7 – Розрахункова схема розташування шпурів у вибої виробки прямокутно-склепінчастої форми: B_{np} і H_{np} – відповідно ширина і висота виробки у проходці, м; S_{ep} – площа врубу, м²; $S_{від}$ – площа вибою для відбійних шпурів, м²; $S_{к}$ – площа вибою для контурних шпурів, м²; b_{ep} і h_{ep} – відповідно ширина і висота врубу, м; W – ЛНО шпуру за радіусом зони інтенсивного подрібнення, м; Δ_o – відстань від контуру виробки до лінії контурних шпурів, м; $W_{z,\phi}$ і $W_{e,\phi}$ – відповідно фактична відстань між рядами відбійних шпурів за шириною та висотою виробки, м; $a_{ф.н.е}$ і $a_{ф.бн.е}$ – відповідно фактична відстань між відбійними шпурами у контурі підосви та з боків і у покрівлі, м; $a_{ф.н.к}$ і $a_{ф.бн.к}$ – відповідно фактична відстань між контурними шпурами підосви та в боках і покрівлі, м

Перший етап методики включає в себе розрахунок і проектування прямих врубів, що набули поширення на шахтах Кривбасу та ПрАТ «ЗЗРК», в яких відстань між шпурами визначається за радіусом зони зминання. Розрахунок прямих врубів виконується у наступній послідовності.

Визначається пробивна відстань між шпурами прямого врубу за величиною радіусу зони зминання згідно формули (10).

Мінімальна площа прямого врубу становить

$$S_{ep} = 0,45 \cdot (l_u \cdot \eta)^{0,91}, \text{ м}^2, \quad (28)$$

де l_u – довжина комплексу шпурів, м; η – коефіцієнт використання шпуру, який змінюється у межах 0,85 – 0,95.

Мінімальна кількість шпурів у врубі, без урахування компенсаційних визначається виразом

$$N_{ep} = S_{ep} / (\pi \cdot R_{zm}^2), \text{ шт.} \quad (29)$$

Другий етап методики включає розрахунок: ЛНО для шпуру, площ груп шпурів, кількість шпурів, відстані між шпурами, величину заряду на шпур, питомі і загальні витрати ВР на вибій. Величина ЛНО для шпуру визначається за радіусом зони інтенсивного подрібнення за формулою (11).

Для прикладу надано результати пробного вибуху вибою орту горизонту 910 м у руді з межею міцністю на стискання 50 – 70 МПа за розрахованими параметрами БПР в умовах ПрАТ «ЗЗРК» (рис. 8).



Рисунок 8 – Фотофіксація вибою орту горизонту 910 м до вибуху (а) та після вибуху (б) за розрахованими параметрами БПР в умовах ПрАТ «ЗЗРК»

Як видно з фото вибою орту після вибуху (рис. 8) руда добре подрібнена та має за фактичними вимірами майже однорідний гранулометричний склад розміром менше 0,2 м, проте зустрічаються поодинокі куски руди розміром 0,2 – 0,4 м, що складають менше 5% від загального об'єму. Відмов зарядів та «стаканів» у вибої не встановлено. Коефіцієнт використання шпуру склав 0,95 – 0,97. За результатами проведених вибухів у орті з використанням наливної ЕВР Україніт-ПП-2 можна стверджувати, що розроблена методика розрахунку параметрів БПР при проведенні гірничих виробок придатна для складання паспортів БПР, а підривання зарядів у вибої показують добрі результати.

Для підвищення ефективності підривних робіт при проведенні підняттяєвих методом шпурових зарядів для шахт Криворізького басейну також розроблена методика розрахунку параметрів БПР, що виконується у такій самій послідовності, як і при проведенні горизонтальних гірничих виробок, але відрізняється відсутністю групи відбійних шпурів. Це пов'язано з тим, що площа підняттяєвих не має суттєвого значення.

Мінімальна кількість шпурів у врубі

$$N_{ep} = 0,144 \cdot (l_u \cdot \eta)^{0,91} \cdot R_{zm}^{-2}, \text{ шт.}, \quad (30)$$

де l_u – довжина комплексу шпурів, що дорівнює 1,7 – 2,2 м.

Відстань між шпурами у врубі визначається за розмірами зони змінання по формулі (10), а для контурних – за зоною інтенсивного подрібнення – формула (11).

Для ефективності підричних робіт при проведенні підняттяєвих методом секційного висадження свердловин для шахт ПрАТ «ЗЗРК» мінімальну кількість свердловин у врубі слід визначати наступним виразом

$$N_{ep} = 0,5 \cdot k_s \cdot \sqrt{\sigma_{cm}}, \text{ шт.} \quad (31)$$

де k_s – коефіцієнт, що враховує форму та площу поперечного перерізу: для підняттяєвих круглої форми коли $S_{np} = 2,5$ і $3,8$ м², $k_s = 0,2$, для підняттяєвих квадратної та прямокутної форм коли $S_{np} = 1,7$ і $2,25$ м², $k_s = 0,2$, а якщо $S_{np} = 4$ і 6 м², $k_s = 1,0$.

У зв'язку з невеликими площами поперечного перерізу, як і при проведенні підняттяєвих методом шпурових зарядів, так і при секційному висадженні свердловин не використовується група відбійних свердловин. Відстань між свердловинами визначається за вже наведеними формулами (10) і (11).

Розроблено комп'ютерну програму проектування БПР «Україніт – проходка», яка повністю автоматизує процес розрахунку параметрів, дозволяє побудувати та скласти паспорт БПР для проведення виробок прямокутно-склепінчастої, аркової та прямокутної форм.

Розділ 5. Обґрунтування параметрів буропідричних робіт при відбиванні руди висвітлює вирішення шостого наукового завдання. На теперішній час залізородними шахтами Криворізького басейну та ПрАТ «ЗЗРК» у якості галузевої, використовується методика, що розроблена проф. Капленком Ю.П., за допомогою якої розраховуються ЛНО та відстань між вибоями свердловин або штангових шпурів. Методика не передбачає застосування ЕВР і не дозволяє враховувати їх детонаційні характеристики при проектуванні БПР. Удосконалення методики виконано з визначенням коефіцієнту працездатності ПВР, який враховує ступінь реалізації швидкості детонації. Особливості визначення параметрів БПР за удосконаленою методикою полягають у наступному.

Інтегральний показник вибуховості за значенням коефіцієнта міцності руди (f) складає

$$C_o = 20 + 56 \cdot \exp(-0,2 \cdot f),$$

а розрахункове значення ЛНО

$$W = K_n \cdot C_o \cdot d \cdot \sqrt{\rho} \cdot e, \text{ м,}$$

де K_n – коефіцієнт, який враховує неоднорідність масиву гірських порід і дорівнює $0,9 - 1,0$; ρ – щільність заряджання ВР, т/м³; e – коефіцієнт працездатності ВР відносно Амоніту № 6 ЖВ, що визначається за формулою (27).

Значення коефіцієнту зближення зарядів і відстань між вибоями свердловин відповідно розраховуються за виразами

$$m = 0,019 \cdot C_o + 0,403, \text{ ч.о.};$$

$$a = m \cdot W, \text{ м.} \quad (32)$$

Визначення параметрів БПР за вдосконаленою методикою дозволили в умовах шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суха Балка» збільшити ЛНО і відстань між вибоями свердловин до 17% (до 3,3 м). Результати відбивання руди з межею міцності на стискання 90 МПа за розрахованими параметрами при відпрацюванні експериментального блоку в маркшейдерських осях 84 – 88 покладу «Головний» на горизонті 1340 м шахта «Ювілейна» ПрАТ «Суха Балка» подано на рис. 9.



Рисунок 9 – Фотофіксація у штреку скреперування (а) та дучці (б) результатів подрібнення руди після її відбивання з використанням наливної ЕВР Україніт-ПП-2 при відпрацюванні запасів експериментального блоку

Аналізом гранулометричного складу встановлено, що відбитий масив було подрібнено на фракції розміром $< 0,01$ м – 51%, $0,01 - 0,10$ м – 31% і $0,10 - 0,40$ м – 18%, а це відповідає добрій якості масиву і вказує на придатність удосконаленої галузевої методики розрахунку параметрів БПР при відбиванні масиву наливною ЕВР Україніт-ПП-2.

За результатами аналітичних досліджень, чисельного моделювання ЛНО та з урахуванням експериментальних даних розроблена методика розрахунку параметрів БПР для відбивання масиву залежно від радіуса зони інтенсивного подрібнення. Послідовність визначення сітки штангових шпурів або свердловин наступна.

Радіус зони змінання та відстань між вибоями штангових шпурів або свердловин визначаються відповідно формул (10) і (32), а їх ЛНО складе

$$W = 1,77 \cdot R_{зм} \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot D^2 \cdot d}{8 \cdot R_{зм} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_c \cdot K_y} \right)^{0,5}, \text{ м.} \quad (33)$$

Коректність результатів запропонованої методики перевірена порівнянням результатів розрахунку ЛНО для відбивання руди з діючою методикою (рис. 10).

З наведеного порівняння значень ЛНО можна стверджувати, що діюча галузева методика надає коректні результати лише для відбивання тріщинуватих і середньо тріщинуватих руд. Тому формування ЛНО у середньота малотріщинуватих і монолітних рудах призведе до утворення негабаритних

кусків руди або відмов зарядів. Це пов'язане зі збільшенням ЛНО на 25 – 48% відносно запропонованої методики, яка більш точно визначає величину ЛНО завдяки врахуванню тріщинуватості масиву та ущільнення руди під дією гірського тиску та вибуху.

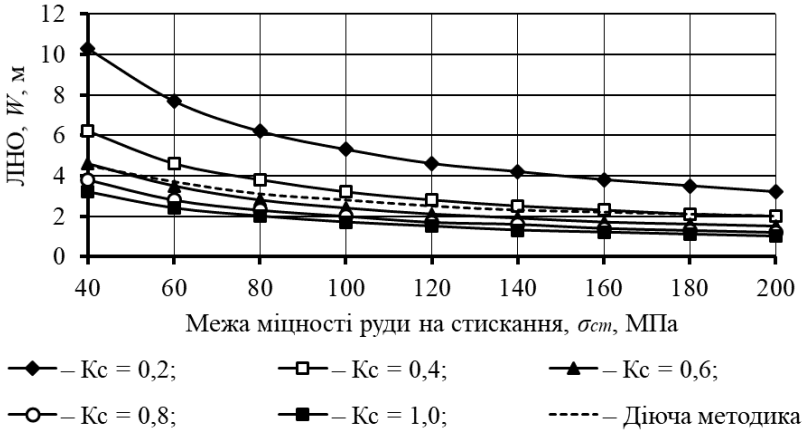


Рисунок 10 – Графіки залежності величини ЛНО від межі міцності руди на стискання для різної категорії тріщинуватості масиву (K_c) згідно діючої та запропонованої методик розрахунку параметрів БПР при діаметрі свердловин 0,105 м і використанні ВР Грамоніт 79/21

У якості прикладу розглянуті результати відбивання магнетитових кварцитів міцністю на стискання 180 – 200 МПа за розрахованими параметрами БПР (ЛНО – 2,0 – 2,5 м) при підриванні наливною ЕВР Україніт-ПП-2 віяла свердловин №2, бурової камери №2, бурового орту (-28) осі, горизонту 462 м, експериментального блоку (-26) – (-32) осей, в умовах шахти «Ім. Орджонікідзе» ПрАТ «ЦГЗК» (рис. 11).



Рисунок 11 – Фотофіксація результатів подрібнення магнетитових кварцитів

Аналіз гранулометричного складу дозволив встановити, що відбитий масив магнетитових кварцитів було подрібнено на фракції розміром $< 0,10$ м – 35%,

0,10 – 0,40 м – 17% і 0,40 – 0,60 м – 48%, що є добрими результатами і вказує на придатність розробленої методики для розрахунку параметрів БПР за зоною інтенсивного подрібнення.

Для виконання підривних робіт розроблено розрахункові схеми щодо ведення очисних робіт із запропонованими параметрами розташування штангових шпурів і свердловин. Оцінкою зміни густини та швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 встановлено, що детонація за довжиною заряду, як у висхідній, так і у низхідній свердловині починає зростати до довжини 15 м, а потім різко зменшується, що вказує на те, що на цій відстані потрібно встановлювати додатковий П-Б. На підставі цього було розроблено конструкцію зарядів ЕВР у висхідних і низхідних свердловинах довжиною до і більше 15 м.

Технологія відбивання руди при камерних системах розробки передбачає використання висхідних віял свердловин. У цьому разі при використанні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 необхідно застосовувати спеціальні засоби для втримання зарядів ЕВР у свердловинах. Тому для відбивання руди запропоновані технологічні схеми ведення очисних робіт із використанням ЕВР при відпрацюванні покладів потужністю більше 5 м, що захищені патентами на винахід. Сутність запропонованої технології полягає в тому, що буріння віял свердловин здійснюють у напрямку нижнього підповерху або поверху, після чого низхідні віяла свердловин заряджають наливною ЕВР.

Очисні роботи супроводжуються відбиванням значних об'ємів руди, яка після вибуху має різний гранулометричний склад. Після виконання підривних робіт особлива увага зосереджується на виході негабаритних кусків, бо це в свою чергу впливає на собівартість відбивання руди. Вихід негабариту призводить до зависань великих кусків руди у випускних отворах, що додатково потребує їх подрібнення накладними зарядами ВР. На багатьох рудних шахтах України розмір кондиційного куска руди складає 0,3 – 0,5 м, а частіше він дорівнює 0,25 – 0,4 м і повинен бути у 3 – 5 разів менше діаметру випускного отвору. Для прогнозування очікуваного розміру куска руди після підривних робіт за радіусом зони зминання, розроблено методику визначення параметрів БПР для відбивання масиву за кондиційним куском руди, у якій кількість тріщин за розрахунковим куском руди на відстані R відповідає виразу

$$N_{mp} = \sqrt{\frac{1,25 \cdot \pi \cdot d \cdot \rho \cdot D^2 \cdot R_{3M}}{d_k^2 \cdot \sigma_{cm} \cdot K_y \cdot K_c}}, \text{ шт.}, \quad (34)$$

де d_k – кондиційний кусок руди, м, а відстань від зарядної порожнини на якій утворюється розрахована кількість тріщин складає

$$R = \sqrt{\frac{1,25 \cdot d \cdot \rho \cdot D^2 \cdot R_{3M}}{N_{mp} \cdot \sigma_{cm} \cdot K_y \cdot K_c} + R_{3M}^2}, \text{ м}, \quad (35)$$

що і визначить ЛНО за розміром кондиційного куска руди у простому виразі

$$W_k = \sqrt{\pi} \cdot R, \text{ м}. \quad (36)$$

Відстань між вибоями штангових шпурів або свердловин розраховують за формулою (32).

Діюча методика розроблялась для відбивання руд середньої та вище середньої міцності з максимальним розміром куска руди 0,7 – 0,9 м (рис. 12). Формування розмірів куска руди менше 0,5 м, може призвести до утворення негабаритних кусків, які потрібно вторинно подрібнювати, що пов'язане зі збільшенням ЛНО на 25 – 40%. Розроблена методика розрахунку параметрів БПР більш точно визначає ЛНО шляхом врахування розміру кондиційного куска руди, її тріщинуватості та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху.

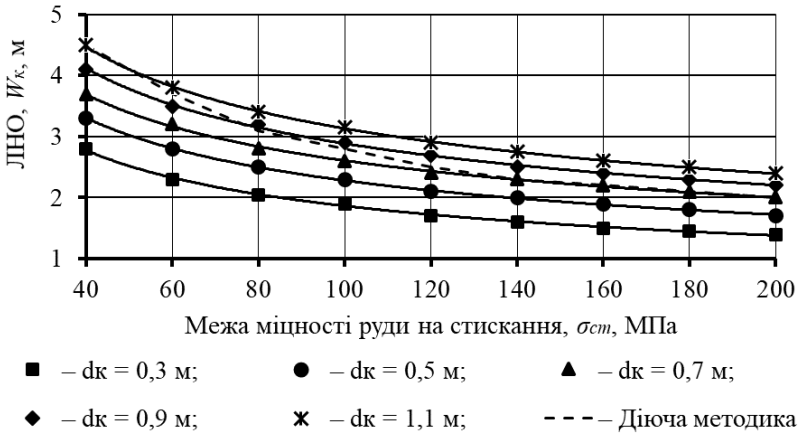


Рисунок 12 – Графіки залежності величини ЛНО від межі міцності руди на стискання при різних розмірах кондиційного куска згідно діючої та розробленої методик розрахунку параметрів БПР

Для автоматизації проектування процесу підсікання руди у блоці розроблено комп'ютерну програму «Україніт – підсічка», що дозволяє скласти проект підсікання запасів руди у блоці за допомогою воронки або траншей.

Розділ 6. Економіко-екологічна ефективність використання емульсійних вибухових речовин при підземному видобуванні руд, присвячений вирішенню сьомого наукового завдання роботи, що ґрунтується на визначенні собівартості проведення 1 м^3 гірничої виробки та відбивання 1 м^3 руди при очисних роботах із використанням запропонованих параметрів БПР, а також екологічній оцінці використання ЕВР при підземному видобуванні руд.

За результатами оцінки економічної ефективності при проведенні гірничих виробок отримано емпіричну залежність, що визначає собівартість проведення 1 м^3 горизонтальної підготовчої виробки

$$C_{np} = K_{ГО} \cdot K_{BP} \cdot e^{0,0015 \cdot \sigma_{cm}}, \text{ грн/м}^3, \quad (37)$$

де $K_{ГО}$ – коефіцієнт, що враховує склад гірничо-прохідницького обладнання:

при використанні комплексу до складу якого належить вітчизняне обладнання $K_{ГО} = 1,0$, при використанні закордонного обладнання $K_{ГО} = 0,7$; K_{BP} – коефіцієнт, що враховує тип ВР: для патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ $K_{BP} = 1160$, для патрованої ЕВР Україніт-П-СА $K_{BP} = 1070$, для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 $K_{BP} = 1000$; σ_{cm} – межа міцності порід на стискання ≥ 40 МПа.

Аналізом собівартості проведення 1 м^3 виробки з використанням вітчизняного та закордонного прохідницького обладнання, встановлено, що при застосуванні патрованої ЕВР Україніт-П-СА, собівартість проведення 1 м^3 зменшується у середньому до 11%, а при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – до 18%, відносно патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ. Впровадження в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» розробленої методики визначення параметрів БПР при проведенні підготовчих виробок дозволило отримати економічну ефективність використання наливної ЕВР Україніт-ПП-2 у розмірі до 700 грн/м, що призвело до зниження собівартості проведення 1 м виробок до 7%.

При оцінюванні економічної ефективності виконання очисних робіт отримано емпіричну залежність зміни величини собівартості відбивання 1 м^3 руди в залежності від межі міцності руди на стискання при використанні бурового верстата НКР-100 МПа та зарядних машин МТЗ-3 і ПЗМК-500

$$C_{від} = K_{BP} \cdot e^{0,019 \cdot \sigma_{cm}}, \text{ грн/м}^3, \quad (38)$$

де K_{BP} – коефіцієнт, що враховує тип ВР: при використанні розсипної ВР Грамоніт 79/21 $K_{BP} = 32$, для безтритилової ВР Україніт-АНФО $K_{BP} = 28$, а для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 $K_{BP} = 20$.

Також отримано емпіричну залежність зміни величини собівартості відбивання 1 м^3 руди в залежності від межі міцності руди на стискання при використанні бурових верстатів Simba та зарядних машин МТЗ-3 і RTCh-23

$$C_{від} = K_{BP} \cdot e^{0,008 \cdot \sigma_{cm}}, \text{ грн/м}^3, \quad (39)$$

де K_{BP} – коефіцієнт, що враховує тип ВР: при використанні розсипної ВР Грамоніт 79/21 $K_{BP} = 55$, для безтритилової ВР Україніт-АНФО $K_{BP} = 44$, а для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 $K_{BP} = 30$.

Порівнянням собівартості відбивання 1 м^3 руди із застосуванням вітчизняних і закордонних бурових верстатів та зарядних машин, встановлено, що з використанням наливної ЕВР Україніт-ПП-2 собівартість зменшується у середньому до 50% відносно розсипної ВР Грамоніт 79/21. Впровадження в умовах шахт ПрАТ «Суша Балка» розробленої методики розрахунку параметрів БПР та технології відбивання масиву за допомогою наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за 2020 рік дозволило отримати економічний ефект 29,88 млн грн та знизити собівартість відбивання руди до 28%.

Екологічний моніторинг використання ЕВР при видобуванні руди в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» протягом 12 років показав, що при застосуванні у 2020 році 78% ЕВР «Україніт» і 22% тритиловмісних ВР від загальних річних витрат ВР, призводить до зниження коефіцієнтів екологічної небезпеки у середньому для оксиду вуглецю в 5,3 рази, а оксиду і діоксиду азоту в 1,25 разів у порівнянні з використанням у 2008 році тритиловмісних ВР. Індекс небезпеки зменшився в 1,5 рази (до 36%).

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-практична проблема з геомеханічного обґрунтування параметрів підземної інфраструктури при видобуванні залізної руди із застосуванням ЕВР на основі встановлення закономірностей утворення зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються в масиві порід при підриванні зарядів ЕВР, а також виявлення закономірностей зміни густини та швидкості детонації ЕВР за довжиною сформованої колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин. Встановленні залежності є основою запропонованих методик визначення параметрів БПР при проведенні гірничих виробок і відбиванні масиву, а також розрахунку працездатності ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації.

Основні наукові та практичні результати, висновки та рекомендації роботи, полягають у наступному:

1. Вперше розроблено аналітичні моделі радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення, що формуються у масиві порід навколо зарядної порожнини при вибуховому навантаженні, які комплексно враховують окрім діаметру зарядної порожнини, детонаційних характеристик ВР, міцності порід, ще їх тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху і діаметр заряду ВР, врахування яких збільшує точність визначення руйнування масиву на 48%. Порівнянням результатів досліджень математичних моделей радіусів зон у межах крайових умов за жорсткими теоретичними посиленнями встановлено розбіжність, яка не перевищує для зон зминання та тріщиноутворення – 2%, а для виявленої зони інтенсивного подрібнення – 8%, що вказує на високу достовірність результатів та коректність розроблених аналітичних моделей.

2. Скінченно-елементним аналізом руйнування масиву моделі навколо зарядної порожнини під дією енергії вибуху встановлено степеневі залежності зміни радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення від діаметру зарядної порожнини, детонаційних характеристик ВР і межі міцності порід на розтягання-стискання. Порівнянням результатів дослідження математичних моделей радіусів цих зон з результатами чисельного моделювання для крайових умов нетріщинуватого масиву встановлено розбіжність радіусів зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення – 4, 8 і 6%, відповідно. Це вказує на високу достовірність отриманих результатів і придатність аналітичних моделей до визначення радіусів цих зон.

3. Моделюванням процесу утворення воронки викиду методом скінченних елементів за головним напруженням розтягання отримано степеневу залежність зміни ЛНО від діаметру зарядної порожнини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід моделі на розтягання-стискання. Розроблено розрахункову схему, за якою отримано аналітичні залежності ЛНО за зонами інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення. Порівнянням отриманих формул встановлено розбіжність результатів розрахунку ЛНО для моделі W_m та ЛНО за радіусом зони тріщиноутворення W_{mp} – 6 – 9%, а за радіусом зони

інтенсивного подрібнення $W_d - 1 - 6\%$. Подальшим порівнянням ЛНО за зонами тріщиноутворення та інтенсивного подрібнення обрано найбільш коректну формулу розрахунку ЛНО, якою виявилась аналітична формула за зоною інтенсивного подрібнення бо розрахована ЛНО за зоною тріщиноутворення для порід міцністю 40 – 60 МПа дає некоректні результати.

4. Встановлено, що максимальна швидкість детонації та працездатність прийнятої ПВР досягається при певній щільності заряджання. Особливо це стосується наливних ЕВР, в яких за довжиною сформованої колонки заряду зростає гідростатичний тиск, що збільшує їх густину у нижній частині заряду, за рахунок зменшення розмірів газових пор. Це, в свою чергу, призводить до зниження її чутливості, а детонаційна хвиля стає нерівномірною та переривчастою, аж до повного її згасання. За загальновідомими законами гідростатики та газової динаміки розроблено методику розрахунку перерозподілу густини ЕВР у зарядних порожнинах для різних кутів їх нахилу. Дослідженнями встановлено степеневі залежності зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною сформованої колонки заряду до 55 м від її початкової густини та кута нахилу свердловини від 0 до 90°. Натурними експериментами, що проведені за допомогою реостатного методу, встановлено степеневі залежності зміни швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 від діаметру заряду та густини. Врахуванням цих залежностей встановлено раціональну початкову густину ЕВР Україніт-ПП-2 у межах 800 – 1000 кг/м³ при якій зберігається рівномірна швидкість детонації за довжиною сформованої колонки заряду до 35 м при різних кутах нахилу свердловин. Отримані залежності стали підґрунтям для розробки та впровадження програмного продукту «Густина та швидкість детонації», для розрахунку густини та швидкості детонації вздовж сформованої колонки заряду для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 як у висхідних, так і у низхідних свердловинах з різними кутами їх нахилу.

5. Використання різних типів ПВР при підземному видобуванні руд, що мають різні детонаційні характеристики, обумовлює необхідність визначення коефіцієнту працездатності, щодо загальноприйнятої еталонної ВР – Амоніт № 6 ЖВ. Оглядом існуючих методик розрахунку коефіцієнту працездатності ПВР встановлено, що цей коефіцієнт визначають за комбінацією різних показників характеристик ВР, що дає значні розбіжності в отриманих результатах розрахунку, а для ЕВР взагалі є суттєво заниженим. Розроблено методику розрахунку коефіцієнту працездатності для всіх ПВР за ступенем реалізації швидкості детонації, яка враховує енергетичні та детонаційні характеристики ВР, такі як теплота вибуху, об'єм продуктів вибуху, їх щільність і швидкість детонації.

6. Розроблено методику розрахунку параметрів БПР при проведенні гірничих виробок, в основу якої закладено принцип розміщення груп шпурів за площами, що вони займають у вибою виробки та розташування шпурів за відбійними контурами. Визначення ЛНО шпuru виконується за радіусом зони інтенсивного подрібнення, який комплексно враховує діаметр шпuru та діаметр самого заряду ВР, щільність і швидкість детонації ВР, міцність порід на

стискання, їх тріщинуватість та ущільнення під дією гірського тиску та вибуху. Також за радіусами зон змінання та інтенсивного подрібнення масиву порід вперше розроблено методику розрахунку параметрів БПР для проведення підняттяєвих виробок методами шпурових і свердловинних зарядів. В основу цих методик покладено розрахунок мінімальної кількості шпурів або свердловин у врубі та визначення відстані між ними за радіусом зони змінання, а розташування контурних шпурів або свердловин визначають за радіусом зони інтенсивного подрібнення. Для проектування паспортів БПР при проведенні виробок розроблено комп'ютерну програму побудови паспорта БПР «Україніт – проходка». Програма повністю автоматизує процес розрахунку параметрів, дозволяє побудувати та скласти паспорт БПР для проведенні виробок прямокутно-склепінчастої, аркової та прямокутної форм.

7. Впроваджено галузеву методику розрахунку параметрів БПР для шахт Кривбасу та ПрАТ «ЗЗРК», яку удосконалено з визначенням коефіцієнта працездатності за ступенем реалізації швидкості детонації ПВР. В умовах шахти «Ім. Орджонікідзе» ПрАТ «ЦГЗК» апробовано методику розрахунку параметрів БПР для відбивання руди за зоною інтенсивного подрібнення із застосуванням наливної ЕВР Україніт-ПП-2, яка більш точно визначає величину ЛНО завдяки врахуванню тріщинуватості руди та її ущільнення під дією гірського тиску та вибуху. За зміною густини та швидкості детонації вздовж сформованої колонки заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2 встановлено раціональні місця розташування П-Б і розроблено конструкції зарядів у висхідних та низхідних свердловинах. Для зменшення трудомісткості заряджання та зниження витрат при виконанні підричних робіт розроблено технологічні схеми відбивання масиву за допомогою низхідних віял свердловин при веденні очисних робіт із застосуванням ЕВР для покладів руди потужністю у понад 5 м. За аналітичною моделлю зони змінання навколо зарядної порожнини, розроблено методику розрахунку параметрів БПР за кондиційним куском руди. Порівнянням результатів розрахунку ЛНО за кондиційним куском руди із методикою розрахунку ЛНО за зоною інтенсивного подрібнення встановлено розбіжність результатів до 19%, що вказує на достатню достовірність і коректність методики. Розроблену методику розрахунку параметрів буропідричних робіт для відбивання масиву за кондиційним куском руди впроваджено у ДУЕК «Мон-Атом» при видобуванні запасів руди родовищ «Гурванбулаг» і «Дорнод» з використанням систем з магазинуванням. Для автоматизації проектування процесу підсікання руди у блоці розроблено комп'ютерну програму «Україніт – підсічка», що дозволяє скласти проект підсікання запасів руди у блоці за допомогою воронки або траншей.

8. Визначенням економічної ефективності при проведенні гірничих виробок і виконанні очисних робіт встановлено, що на собівартість проведення 1 м³ виробки або 1 м³ відбитої руди впливає не тільки тип ВР і гірничі обладнання, а й параметри БПР, що розраховані за запропонованими методиками. Впровадженням в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» розробленої методики розрахунку параметрів БПР при проведенні підготовчих виробок отримано економічну ефективність використання наливної ЕВР Україніт-ПП-2 до 700 грн/м, що знизило собівартість проведення 1 м виробок до 7%. Впровадженням в умовах шахт ПрАТ «Суха Балка» розробленої

методики розрахунку параметрів БІР та технології відбивання руди за допомогою наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за 2020 рік отримано річний економічний ефект у 29,88 млн грн та знижено собівартість відбивання руди до 28%.

9. Екологічною оцінкою використання ЕВР при підземному видобуванні руди в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» протягом 12 років встановлено, що при застосуванні у 2020 році 78% ЕВР типу «Україніт» і 22% тротиловмісних ВР від загальних річних витрат, знизило коефіцієнти екологічної небезпеки у середньому для оксиду вуглецю в 5,3, а оксиду та діоксиду азоту в 1,25 разів, у порівнянні з використанням у 2008 році тротиловмісних ВР. Це зменшило індекс небезпеки у середньому в 1,5 рази (до 36%) при використанні ЕВР типу «Україніт» у порівнянні з використанням тротиловмісних ВР і знизило техногенне навантаження на атмосферне повітря.

Основні положення і результати дисертації були опубліковані в наступних роботах:

1. Гороя А.И., Миронова И.Г., **Кононенко М.Н.**, Павличенко А.В. Технология повышения экологической безопасности при добыче железных руд подземным способом : монография. Днепропетровск : Литограф, 2014. 136 с.

2. Khomenko O., Rudakov D., **Kononenko M.** Automation of drill and blast design. *Technical And Geoinformational Systems In Mining*. 2011. P. 271–275. DOI: 10.1201/b11586-45 (*Scopus, Web of Science*)

3. Vladyko O., **Kononenko M.**, Khomenko O. Imitating modeling stability of mine workings. *Geomechanical processes during underground mining*. 2012. P. 147–150. DOI: 10.1201/b13157-26. (*Scopus, Web of Science*)

4. Khomenko O., **Kononenko M.**, Myronova I. Blasting works technology to decrease an emission of harmful matters into the mine atmosphere. *Annual Scientific-Technical Colletion – Mining of Mineral Deposits*. 2013. P. 231–235. DOI: 10.1201/b16354-43. (*Scopus*)

5. Khomenko O., **Kononenko M.**, Petlyovanyy M. Investigation of stress-strain state of rock massif around the secondary chambers. *Progressive Technologies Of Coal, Coalbed Methane, And Ores Mining*. 2014. P. 241–245. DOI: 10.1201/b17547-43. (*Scopus*)

6. Khomenko O., **Kononenko M.**, Petlovanyi M. Analytical modeling of the back-fill massif deformations around the chamber with mining depth increase. *New Developments In Mining Engineering 2015*. 2015. P. 265–269. DOI: 10.1201/b19901-47. (*Scopus*)

7. Khomenko O., **Kononenko M.**, Netecha M. Industrial research into massif zonal fragmentation around mine workings. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10, № 1. P. 50–56. DOI: 10.15407/mining10.01.050. (*Scopus, Web of Science*)

8. Khomenko O., **Kononenko M.**, Danylchenko M. Modeling of bearing massif condition during chamber mining of ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10, № 2. P. 40–47. DOI: 10.15407/mining10.02.040. (*Scopus, Web of Science*)

9. **Kononenko M.**, Khomenko O., Sudakov A., Drobot S., Lkhagva Ts. Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. Vol. 10, № 3. P. 101–106. DOI: 10.15407/mining10.03.101. (*Scopus, Web of Science*)

10. Хоменко О.Е., **Кононенко М.Н.**, Дронов А.П. Лабораторные исследования зонального структурирования массива вокруг горных выработок. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2016. № 18. С. 103–111.

11. Khomenko O., **Kononenko M.**, Astafiev D. Effectiveness of geo-energy usage during underground mining of deposits. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 22. P. 100–106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/aef.22.100.

12. Khomenko O., **Kononenko M.**, Myronova I. Ecologic-and-technical aspects of iron-ore underground mining. *Mining of mineral deposits*. 2017. Vol. 11, № 2. P. 59 – 67. DOI: 10.15407/mining11.02.059. (*Scopus, Web of Science*)

13. Хоменко О.Е., **Кононенко М.Н.**, Миронова И.Г., Юрченко К.О. Пути снижения техногенной нагрузки на горнодобывающие регионы Украины. *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. № 51. С. 77–83.

14. Khomenko O., **Kononenko M.**, Bilegsaikhan J. Classification of theories about rock pressure. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 157–167. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.277.157. (*Scopus*)

15. Хоменко О.Е., **Кононенко М.М.** Феномен капсулювання підземної виробки: виявлення, моделювання, використання. *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. № 52. С. 166–177.

16. **Kononenko M.**, Khomenko O., Astafiev D. New classification of ore deposits mining methods. *Advanced Engineering Forum*. 2017. Vol. 25. P. 71–79. DOI: 10.4028/www.scientific.net/aef.25.71.

17. Хоменко О.Е., **Кононенко М.Н.**, Ляшенко В.И. Эволюция принципов поддержания подземных выработок. *Збірник наукових праць НГУ*. 2018. № 53. С. 113–127.

18. Хоменко О.Е., **Кононенко М.Н.** Технологии добычи камнесамоцветного сырья в условиях энергетического нарушения недр. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2017. № 19. С. 131–141.

19. Khomenko O.Y., **Kononenko M.M.**, Myronova I.G., Sudakov A.K. Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 2. P. 29–38. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/3. (*Scopus*)

20. Khomenko O., **Kononenko M.**, Kovalenko I., Astafiev D. Self-regulating roof-bolting with the rock pressure energy use. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 60. P. 00009. DOI: 10.1051/e3sconf/20186000009. (*Scopus*)

21. Khomenko O., **Kononenko M.** Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 3. P. 12–21. DOI: 10.29202/nvngu/2019-3/3. (*Scopus*)

22. **Kononenko M.**, Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining Of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13, № 3. P. 22–30. DOI: 10.33271/mining13.03.022. (*Scopus, Web of Science*)

23. Khomenko O., **Kononenko M.**, Myronova I., Savchenko M. Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 123. P. 01039. DOI: 10.1051/e3sconf/201912301039. (*Scopus*)

24. **Кононенко М.М.**, Нечит О.В. Рациональні параметри буропідричних робіт при проведенні виробок в умовах ПрАТ «Запорізький ЗРК». *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*. 2020. № 22. С. 46–56. DOI: 10.37101/ftpgp22.01.004.

25. **Кононенко М.**, Khomenko O., Kovalenko I., Savchenko M. Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 2. P. 69–75. DOI: 10.33271/nvngu/2021-2/069. (*Scopus*)

26. **Кононенко М.**, Khomenko O. New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15, № 2. P. 111–123. DOI: 10.33271/mining15.02.111. (*Scopus, Web of Science*)

27. **Кононенко М.М.**, Хоменко О.Є., Коробка Є.О. Параметри буропідричних робіт для проведення гірничих виробок. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*. 2021. № 23. С. 54–71. DOI: 10.37101/ftpgp23.01.004.

28. **Кононенко М.М.**, Хоменко О.Є., Коваленко І.Л., Миронова І.Г. Дослідження густини та швидкості детонації емульсійних вибухових речовин. *Збірник наукових праць НГУ*. 2022. № 68. С. 43–57. DOI: 10.33271/crpnmu/68.043.

29. **Кононенко М.**, Khomenko O., Myronova I., Kovalenko I. Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*. 2022. Vol. 40, № 2, P. 88–97. DOI: 10.32056/KOMAG2022.2.4.

30. **Кононенко М.М.**, Хоменко О.Є., Косенко А.В. Чисельне моделювання лінії найменшого опору при підриванні зарядів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2022. № 69. С. 43–57. DOI: 10.33271/crpnmu/69.043.

31. **Кононенко М.М.**, Хоменко О.Є., Миронова І.Г. Спосіб видобування корисних копалин буропідричним методом : пат. 101217 Україна : МПК Е21С 41/22. № а201104028 ; заявл. 04.04.2011; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.

32. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, Миронова І.Г., Мальцев Д.В. Спосіб видобування корисних копалин буропідричним методом : пат. 108639 Україна : МПК Е21С 41/22. № а201211588 ; заявл. 08.10.2012; опубл. 25.05.2015, Бюл. №10.

33. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, Хорольський А.О., ТОВ «ІСТ-ФОРТ». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 98464 Україна. Комп'ютерна програма «Програма побудови паспорту буропідричних робіт «Україніт-проходка». опубл. 30.09.2020, Бюл. № 60.

34. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, ТОВ «ІСТ-ФОРТ». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 110658 Україна. Комп'ютерна програма «Програма побудови проекту підсікання запасів руди у блоці «Україніт – підсічка». опубл. 31.01.2022, Бюл. № 68.

35. Хоменко О.Є., Рудаков Д.В., **Кононенко М.Н.** Автоматизація проектування паспортів буровзривних робіт путем оптимізації розміщення шпурів. *Форум гірників-2011* : Міжн. наук.-техн. конф. Дніпропетровськ: РВК ДВНЗ «НГУ» 2011. С. 39–43.

36. Владыко А.Б., **Кононенко М.Н.**, Литвинюк Е.А. Имитационное моделирование работы проходческого оборудования при проведении горных выработок. *Школа підземної розробки* : Матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. Дніпропетровськ : НГУ, 2012. С. 284–293.

37. Хоменко О., **Кононенко М.**, Данильченко М. До обґрунтування параметрів підготовки запасів руд при камерних системах розробки. *Школа підземної розробки* : між нар. наук.-практ. конф., 15–18 серпня 2016 р. Бердянськ, 2016. С. 85–86.

38. **Кононенко М.**, Данильченко М. Удосконалення підготовчих робіт при камерних системах розробки. *Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі* : між нар. наук.-практ. конф., 14 грудня 2016 р. Кривий Ріг, 2016. С. 102.

39. **Kononenko M.**, Khomenko O., Astafiev D. New classification of ore deposits mining methods. *Energy efficiency and energy saving 2017* : Materials of the international scientific and practical conference. Dnipro: NMU, 2017. P. 24.

40. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, Миронова І.Г. Екологічна безпека видобування залізних руд. *Школа підземної розробки* : між нар. наук.-практ. конф., 4–8 серпня 2018 р. Бердянськ, 2018. С. 79–80.

41. **Кононенко М.М.**, Коваленко І.Л., Хоменко О.Є. Енергетичний підхід до впровадження сучасних нітратних енергоконденсованих систем. *Сучасні енергетичні технології* : XX Українська конференція з неорганічної хімії, тези доп. Дніпро, ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 203.

42. **Kononenko M.**, Khomenko O., Myronova I. Parameters of drilling-and-blasting operations for the use emulsion explosives. *Physical & Chemical Geotechnologies* : Materials of the international scientific and practical conference. Dnipro : DUT, 2018. P. 39–40.

43. Khomenko O., **Kononenko M.** Geo-energetics of Ukrainian Shield. *Physical & Chemical Geotechnologies* : Materials of the international scientific and practical conference. Dnipro : DUT, 2018. P. 65–66.

44. Миронова І.Г., Хоменко О.Є., **Кононенко М.Н.** Снижение экологической опасности добычи руд в Украине. *Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр* : материалы XVII международной конференции. Актау : КГУТИ им. Ш. Есенова, 2018. С. 49–51.

45. **Kononenko M.**, Khomenko O. New theory of rock massif fragmentation by using explosion energy. *Physical & Chemical Geotechnologies* : Materials of the international scientific and practical conference. Dnipro : DUT, 2020. P. 29–30.

46. **Кононенко М.**, Хоменко О. Моделювання зон зминання та подрібнення масиву порід під дією енергії вибуху. *Український гірничий форум – 2021* : Міжн. наук.-техн. конф. Дніпро: РВК НТУ «ДП» 2021. С. 53–64.

47. **Kononenko M.**, Khomenko O. Mathematic simulation for the rock mass destruction by blasting. *Physical & Chemical Geotechnologies* : Collection of scientific works from Scientific and Practical Conference. Dnipro : DUT, 2021. P. 27–37. DOI: 10.15407/pcgt.21.05

48. Хоменко О.Є., **Кононенко М.Н.**, Мальцев Д.В. Горное оборудование для подземной разработки рудных месторождений: справочное пособие. Днепропетровск : НГУ, 2011. 448 с.

49. Горнорудное дело Украины в сети Интернет : справочник / Хоменко О.Є., **Кононенко М.Н.**, Владико А.Б., Мальцев Д.В. Днепропетровск : ГВУЗ «НГУ», 2011. 288 с.

50. Далд уурхайн өрмийн машин, тоног төхөөрөмж: лавлах бичиг / О.Є. Хоменко, **М.Н. Кононенко**, Д.В. Мальцев и др. Улаанбаатар, 2013. Д. 1. 190 х.

51. **Кононенко М.М.**, Хоменко О.Є., Усатий В.Ю. Вибір і розрахунок систем підземної розробки рудних родовищ. Дніпропетровськ : НГУ, 2013. 217 с.

52. Симанович Г.А., Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.** Руйнування гірських порід вибухом. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. 207 с.

53. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, Савченко М.В. Технологія підземної розробки рудних родовищ. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 450 с. DOI: 10.33271/dut.001.

54. Хоменко О.Є., **Кононенко М.М.**, Косенко А.В. Процеси підземної розробки рудних родовищ. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. 206 с. DOI: 10.33271/dut.002.

Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві, полягає в наступному: [2, 4, 6, 12, 13, 16, 19, 22 – 35, 39, 41, 42, 45 – 48, 51 – 54] – проведення досліджень і оформлення результатів; [1, 3, 5, 8, 9, 14, 18, 36, 37, 38, 40, 44, 49] – постановка завдань та аналіз результатів дослідження; [7, 10, 11, 15, 17, 20, 21, 43, 50] – підготовка матеріалів.

АНОТАЦІЯ

Кононенко М.М. Геомеханічне обґрунтування параметрів підземної інфраструктури при видобуванні залізної руди із застосуванням емульсійних вибухових речовин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.09 «Геотехнічна і гірнича механіка» та 05.15.04 «Шахтне та підземне будівництво». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» МОН України, м. Дніпро, 2022.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми з геомеханічного обґрунтування параметрів підземної інфраструктури при видобуванні залізних руд із застосуванням емульсійних вибухових речовин на основі встановлених закономірностей формування зон зминання, інтенсивного подрібнення та тріщиноутворення навколо зарядної порожнини, що утворюються в масиві порід під дією вибуху в залежності від діаметрів порожнини та заряду, детонаційних характеристик вибухової речовини, межі міцності порід на розтягання-стискання, їх тріщинуватості і ущільнення під дією гірського тиску та вибуху, а також встановлених закономірностей зміни густини та швидкості детонації емульсійних вибухових речовин за довжиною сформованої колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин. Визначені закономірності покладені в основу методик розрахунку параметрів буропідричних робіт для створення підземної інфраструктури при видобуванні руд, а також розрахунку працездатності як емульсійних, так і інших промислових вибухових речовин за ступенем реалізації швидкості детонації. За зміною густини та швидкості детонації емульсійної вибухової речовини Україніт-ПП-2 вздовж сформованої колонки заряду розроблено конструкцію зарядів у висхідних і низхідних свердловинах довжиною до 15 і більше метрів. Для відбивання масиву обґрунтовані технологічні схеми ведення очисних робіт із використанням емульсійних вибухових речовин за допомогою низхідних віял свердловин при відпрацюванні покладів потужністю більше 5 м. Використання розроблених методик при розрахунку параметрів буропідричних

робіт для проведення гірничих виробок дозволить знизити собівартість проходки 1 м³ виробки до 18%, а для відбивання 1 м³ руди – до 50%.

Ключові слова: гірський масив, емульсійна вибухова речовина, зарядна порожнина, зона інтенсивного подрібнення, густина емульсійної вибухової речовини, швидкість детонації, лінія найменшого опору

ABSTRACT

Kononenko M.M. Geomechanical substantiation of underground infrastructure parameters during iron-ore mining with the application of emulsion explosives. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialties 05.15.09 “Geotechnical and Mining Mechanics” and 05.15.04 “Mining and Underground Construction”. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2022.

The dissertation is dedicated to the solution of the actual scientific-and-practical issue of geomechanical substantiation of the underground infrastructure parameters during the iron-ore mining with the application of emulsion explosives based on the established patterns of crushing zones formation, intensive crumpling and cracking around the charging cavity, which are formed in the rock mass under the action of the explosion, and as well as establishing patterns of changes in the density and detonation velocity of emulsion explosives along the length of the formed column of charge at different angles of inclination of the boreholes.

The analytical models of the crushing zones radius, intensive crumpling and cracking formed in the rock mass around the charging cavity under explosive loading have been developed for the first time, which comprehensively taking into account the diameter of the charging cavity, the detonation characteristics of the explosive substance, the strength of the rocks, as well as their cracking and compaction under the action of rock pressure and explosion, as well as the diameter of the explosive charge. The finite-element analysis of the destruction of model mass around the charging cavity under the action of the explosion energy established the power dependence of the change in the radius of the crumpling zones, intensive grinding and cracking on the diameter of the charging cavity, the detonation characteristics of the explosive substance, and the tensile-compressive strength limit of the rocks. The suitability of the analytical models for determining the radius of the specified zones was established by comparing the results of the research of the mathematical models of the radius of these zones with the results of numerical modeling for the boundary conditions of a monolithic non-cracked mass. The power-law dependence of the change in the line of least resistance on the diameter of the charging cavity, the density and detonation velocity of the explosive substance, and the limit of tensile-compressive strength of rocks was obtained by modeling the process of formation of the ejection funnel with application of the finite element method based on the main tensile stress of the model. Further research revealed the most accurate formula for calculating the line of least resistance, which is an analytical dependence on the zone of intensive grinding.

The methodology for calculating the redistribution of the density of the emulsion explosive in charging cavities with different angles of inclination has been developed. The power dependence of the change in the density of the bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2 along the length of the formed charge column up to 55 m, depending on its initial density and the angle of inclination of the borehole from 0 to 90° has been established. The power dependence of the change in the detonation velocity of the bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2 on the charge diameter and density have been performed by using the rheostat method and established by natural experiments. The rational initial density of the emulsion explosive Ukrainit-PP-2 was determined with taking into account these dependencies, which varies within the range of 800-1000 kg/cu.m and at the same time the uniform detonation velocity is maintained along the length of the charge column up to 35 m at different angles of inclination of the boreholes. The resulting dependencies became the basis for the development and implementation of the software product “Density and Velocity of Detonation”, which allows you to calculate the density and velocity of detonation along the formed charge column for bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2 in both ascending and descending boreholes with different angles of their inclination. Also, taking into account these dependencies made it possible to develop a methodology for calculating the performance factor based on the degree of realization of the detonation velocity for all industrial explosives, which allows comprehensive consideration of the heat and volume of explosion gases, their density and detonation velocity.

The developed method of calculating the parameters of drilling-and-blasting operations during horizontal and inclined mining operations has been implemented at the mines of PJSC “Zaporizskiy iron-ore plant”, which is based on the principle of placing groups of holes according to the areas they occupy in the workings and their location along the cutting contours. The methods of calculating the parameters of drilling-and-blasting for uplift workings conducting by the methods of blast hole and borehole charges are proposed according to the crushing zones radius and intensive crumpling of rock mass around the charging cavity. The computer program for building blasting passports “Ukrainit – Construction” was developed for automation the design of blasting passports during horizontal and inclined mining operations.

The current industry methodology for calculating the parameters of drilling-and-blasting operations for the mines of Kryvbas and PJSC “Zaporizskiy iron-ore plant” has been improved due to the determination of the efficiency factor based on the degree of realization of the detonation velocity for all types of industrial explosives. The methods of calculating the parameters of drilling-and-blasting operations for the mass reflection in the zone of intensive crushing and the conditioned piece of ore have been developed and tested. The rational locations of primed-cartridges were established and the designs of charges in ascending and descending boreholes up to 15 m long and more were developed on the basis of the change in the density and velocity of detonation along the charge of bulk emulsion explosive Ukrainit-PP-2. The technological schemes for reflecting ore application by downward fans of boreholes during stoping operations in deposit chambers with a capacity of more than 5 m have been developed in order to reduce the complexity of charging and reduce

costs during blasting operations conducting, due to the exclusion of special means of holding charges of emulsion explosives in boreholes. For automation design of ore cutting in blocks, a computer program for the development of a project for cutting a block “Ukrainit – Undercut” has been developed, which fully automates the process of calculation, construction and drawing up of a project for cutting ore reserves in a block with funnels or trenches.

The application of the developed methods in calculating the parameters of drilling-and-blasting operations for mining workings allows to reduce the cost of 1 cu.m of workings drilling up to 18%, and for breaking 1 cu.m of ore – up to 50%. The ecological assessment established decreasing in the danger index to 36% during application of emulsion explosives of the “Ukrainit” type in comparison with the application of TNT-containing explosives, which reduced the man-made loading on the atmospheric air.

Key words: rock mass, emulsion explosive, charging cavity, zone of intensive grinding, emulsion explosive density, detonation velocity, line of least resistance.

КОНОНЕНКО Максим Миколайович

**ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПІДЗЕМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ ВИДОБУВАННІ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН
(Реферат)**

Здано на складання 03.10.2022 р. Підписано до друку 03.10.2022 р.

Формат 210x48. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,9.

Тираж 100 прим. Зам. № 610

Видавництво ПП Вахмістров О.Є.
Адреса видавництва та друкарні: 49000,
Дніпро, вул. Пісаржевського, буд. 18
тел. +380632598309
ел. адреса: 8102@ukr.net

