

© М.М. Кононенко<sup>1</sup>, О.Є. Хоменко<sup>1</sup>, І.Г. Миронова<sup>1</sup>, І.Л. Коваленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, Україна

## ЕКОНОМІКО-ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИДОБУВАННІ РУД

© M. Kononenko<sup>1</sup>, O. Khomenko<sup>1</sup>, I. Myronova<sup>1</sup>, I. Kovalenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

## ECONOMICAL-ECOLOGICAL EFFICIENCY OF USING EMULSION EXPLOSIVE IN UNDERGROUND ORE MINING

**Мета.** Встановлення економіко-екологічної ефективності використання емульсійних вибухових речовин (ЕВР) при підземному видобуванні руд із застосуванням різноманітного гірничого обладнання.

**Методика дослідження.** За допомогою кореляційно-регресійного аналізу отриманих розрахункових даних встановлено експонентні залежності собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки та відбивання масиву залежно від міцності руди або породи на стискання, типу вибухової речовини (ВР) та гірничого обладнання. Розрахунок рівня екологічної небезпеки в умовах шахт Приватного акціонерного товариства «Запорізький залізорудний комбінат» (ПрАТ «ЗЗРК») виконували за допомогою методики, що враховує ризик для здоров'я населення, яке знає негативного впливу від забруднюючих речовин, що виділяються при застосуванні ВР.

**Результати дослідження.** Виконано розрахунок економічної ефективності при проведенні підготовчих гірничих виробок із використанням різного гірничопрохідницького обладнання та типів ВР. Встановлено загальну експонентну залежність визначення собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> виробки залежно від міцності порід на стискання при використанні різних типів ВР та прохідницького обладнання. Проведено розрахунок економічної ефективності виконання очисних робіт за допомогою різних комплексів гірничого обладнання та типів ВР. Отримано експонентні залежності визначення собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди при застосуванні різних бурових верстатів та зарядних машин із використанням різних типів ВР. Екологічною оцінкою використання ЕВР в умовах залізорудної шахти встановлено зменшення концентрацій екологічно небезпечних речовин та зниження коефіцієнтів екологічної небезпеки, що призвело до зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря.

**Наукова новизна.** Собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки та відбивання масиву змінюється за експонентними залежностями залежно від міцності руди або породи на стискання, типу ВР та гірничого обладнання, за допомогою яких розраховується економічна ефективність використання ЕВР при підземному видобуванні руд.

**Практичне значення.** Результатами досліджень отримано емпіричні залежності собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки та відбивання масиву залежно від міцності руди або порід на стискання при застосуванні вітчизняного та закордонного гірничого обладнання, що дозволяють розрахувати економічну ефективність використання патентованих або наливних ЕВР при підземному видобуванні руд.

**Ключові слова:** залізна руда, емульсійна вибухова речовина, гірниче обладнання, економічна ефективність, екологічна оцінка.

**Вступ.** Сучасним етапом розвитку гірничодобувної промисловості багатьох країн світу є концентрація виробництва та вдосконалення технологій видобування. Це можливо за рахунок використання новітнього гірничого обладнання, вдосконаленню та розробці нових методик розрахунку параметрів буропідричних робіт (БПР), що у комплексі забезпечує покращення показників прохідницьких і видобувних робіт. Ще одним напрямом вдосконалення технології ведення БПР, є підвищення безпеки підричних робіт і зниження їх впливу на довкілля за рахунок заміщення тротиловісних ВР на ЕВР вітчизняного виробництва. Як відомо ЕВР є абсолютно безпечні у транспортуванні й зберіганні [1-4], екологічно чисті [5, 6] та економічно вигідні [7-9]. Тому на сьогодні однією з основних задач гірничого виробництва є підвищення ефективності руйнування гірського масиву вибухом за допомогою ЕВР із використанням сучасного гірничого обладнання.

**Постановка завдання.** Угода про асоціацію України з Європейським союзом передбачає введення європейських стандартів і норм у сфері охорони довкілля, зокрема охорони атмосферного повітря. Для зниження негативного впливу на навколишнє середовище, особливо на атмосферне повітря, та згідно з Цільовою регіональною програмою переходу гірничо-збагачувальних комбінатів на безтритилові ВР, гірничі підприємства з відкритим способом розробки вже у 2011 року використовували ЕВР об'ємом 99% від річних потреб [10]. Що стосується гірничих підприємств з підземним способом розробки, то до 2008 року всіма залізрудними шахтами України для виконання підричних робіт, що пов'язані з видобуванням руд, використовувались тротиловісні ВР. Враховуючи високу вартість цих ВР та їх технологічну і екологічну небезпеку, доцільним є застосування таких аналогів, що виготовляються безпосередньо на місцях ведення підричних робіт і є більш безпечними та екологічними. На підставі цього для підвищення екологічної безпеки, з 2009 року на базовому підприємстві ПрАТ «ЗЗРК» почалося впровадження екологічної ЕВР типу «Україніт» і безтритилових ВР. Річний об'єм споживання шахтами ПрАТ «ЗЗРК» безтритилових ВР і ЕВР типу «Україніт» у 2009 році складав 16% від річних витрат ВР, а вже у 2020 році зріс до 78%.

**Методика досліджень.** Метою досліджень є встановлення економіко-екологічної ефективності використання ЕВР при підземному видобуванні руд із застосуванням різноманітного гірничого обладнання.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

- визначити економічну ефективність проведення гірничих виробок та відбивання масиву за допомогою ЕВР із використанням різноманітного гірничого обладнання;
- встановити собівартість проведення гірничих виробок та відбивання масиву із застосуванням різних ВР та гірничого обладнання;
- провести екологічну оцінку використання ЕВР при видобуванні руди підземним способом.

Методика встановлення економіко-екологічної ефективності використання ЕВР із застосуванням різноманітного гірничого обладнання при підземному видобуванні руд включало в себе виконання наступних етапів:

– визначення економічної ефективності та встановлення залежностей собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки та відбивання масиву в залежності від міцності руди або породи на стискання, типу ВР та гірничого обладнання;

– розрахунок приземної концентрації екологічно небезпечних речовин та індексів безпеки для об'єктів навколишнього середовища при використанні тротиловмісних ВР і ЕВР в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК».

Для порівняння ефективності технологічних схем підготовки та нарізки блоку, очисних робіт або окремих виробничих процесів при використанні різних комплексів гірничого обладнання, собівартість можливо визначати окремо за кожним видом робіт керуючись методикою, що у повному обсязі подано у роботі [11]. Методика включає в себе визначення основних витрат, що пов'язані з проведенням гірничих виробок і відбиванням руди за допомогою БПР. Калькуляція собівартості визначається сумою витрат за фондом заробітної плати робітників та інженерно-технічних працівників, основних матеріалів, енергії, амортизаційних відрахувань обладнання і за витратами на його поточний ремонт і утримання. Питомі витрати на 1 т руди отримують шляхом розділення конкретного виду витрат на видимий видобуток за блоком або за окремим видом підготовчих чи очисних робіт (проведення виробок, підсікання або відрізка запасів камери). Тому найбільш універсальним показником собівартості при проведенні гірничих виробок і очисних роботах або за їх окремими процесами був прийнятий розрахунок витрат на 1 м<sup>3</sup> руди чи породи.

Розрахунок рівня екологічної безпеки виконували за допомогою методики [12], яка враховує ризик для здоров'я населення, яке зазнає негативного впливу від забруднюючих речовин, що виділяються при застосуванні ВР.

**Виклад основного матеріалу. Результати розрахунку економічної ефективності при проведенні гірничих виробок.** Визначення собівартості проведення гірничої виробки включає в себе розрахунок суми всіх витрат на виконання основних і допоміжних робочих процесів, що припадає на 1 м виробки, але найбільш об'єктивним показником є собівартість 1 м<sup>3</sup> виробки. Для отримання коректних результатів собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> виробки необхідно вірно визначитися з вихідними даними для виконання розрахунків. На результати розрахунків економічної ефективності при проведенні гірничих виробок за допомогою БПР мають вагомий вплив наступні вихідні дані, до яких відносяться:

– гірничо-геологічні умови проведення виробки, а саме площа поперечного перерізу у проходці та фізико-механічні властивості порід;

– параметри БПР, до яких відноситься діаметр і глибина шпурів та їх кількість, тип ВР;

– гірничо-прохідницьке обладнання, що буде використовуватись у вибою виробки для буріння шпурів, заряджання шпурів та навантаження гірської маси.

Аналізом гірничо-геологічних умов видобування залізних руд на шахтах України встановлено, що гірничі виробки проводяться у породах і рудах міцністю на стискання від 30 до 200 МПа. Для встановлення собівартості проведення гірничої виробки в залежності від зміни міцності порід, для розрахунку прийма-

ємо міцність порід на стискання 60, 120 і 180 МПа. Подальшим аналізом виробничої діяльності шахт встановлено найбільш поширену площу поперечного перерізу підготовчої виробки, що дорівнює 12 м<sup>2</sup>.

При проведенні виробок найбільшого поширення набули шпури діаметром 0,043 м з середньою глибиною 2,5 м. Параметри БПР розраховуються для наведеної вище міцності порід з використанням патрованої ВРАмоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2, за новою методикою розрахунку паспорту БПР з урахуванням діаметру заряду ВР, тиску продуктів вибуху та міцності порід [13-16]. Аналізом бурильних установок та навантажувальних машин, які використовуються для проведення горизонтальних виробок в умовах залізрудних шахт України, встановлено, що на шахтах Криворізького басейну до складу гірничопрохідницького комплексу входять бурильна установка УБШ та навантажувальна машина ППН-3А, і у поодиноких випадках використовується комплекс Воомер з вантажно-доставною машиною EST-3,5. В умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» навпаки, в основному використовуються комплекси, до складу яких належить бурильна установка Воомер або DD з вантажно-доставними машинами ST і EST або LH.

На підставі аналізу виробничої діяльності залізрудних шахт при проведенні горизонтальних гірничих виробок, визначимося з вихідними даними для розрахунку собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> гірничої виробки. Розрахунок собівартості проведення горизонтальної підготовчої виробки виконували для двох варіантів гірничо-прохідницьких комплексів з використанням патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2 для порід міцністю на стискання 60, 120 і 180 МПа. Вихідні дані для варіанту №1: горизонтальна підготовча виробка площею 12 м<sup>2</sup>, міцність порід на стискання – 60, 120 і 180 МПа, ВР – патровані Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА й наливна ЕВР Україніт-ПП-2, діаметр шпуру – 0,043 м, глибина шпурів – 2,5 м, гірничопрохідницький комплекс – бурильна установка УБШ-227 з бурильною машиною Б106 або Б140, навантажувальна машина ППН-3А, зарядна машина для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – ЗЕП-10. Вихідні дані для варіанту №2: горизонтальна підготовча виробка площею 12 м<sup>2</sup>, міцність порід на стискання – 60, 120 і 180 МПа, ВР – патровані Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА й наливна ЕВР Україніт-ПП-2, діаметр шпуру – 0,043 м, глибина шпурів – 2,5 м, гірничопрохідницький комплекс – бурильна установка Воомер S1D з бурильною машиною COP MD20, вантажно-доставна машина EST-3,5, зарядна машина для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – ЗЕП-10. При розрахунку собівартості проведення виробки не враховувалося її кріплення. Розрахунок трудомісткості робіт з буріння шпурів у вибою виробки, їх заряджання та підривання, навантажування гірської маси, а також визначення витрат енергії та матеріалів за варіантами виконували за формулами, що подано у роботах [11, 17].

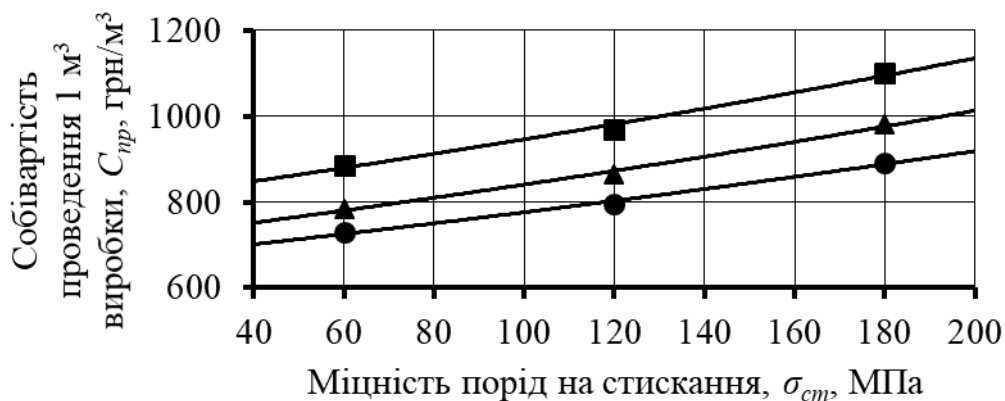
Як приклад проаналізуємо залежності зміни собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки за варіантом № 1 в залежності від міцності порід на стискання при використанні патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2, що подано на рис. 1.



■ – Амоніт № 6 ЖВ; ▲ – Україніт-П-СА; ● – Україніт-ПП-2  
 Рис. 1. Графіки залежності зміни собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки за варіантом № 1 в залежності від міцності порід на стискання

Як видно з графіку, при застосуванні патрованої ЕВР Україніт-П-СА, собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> зменшується на 11 – 12%, а при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – на 17 – 19%, відносно використання патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ. Це вказує на те, що на собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки істотно впливають міцність порід на стискання та параметри БПР. Якщо порівняти собівартість 1 м<sup>3</sup> виробки при використанні патрованої ЕВР Україніт-П-СА та наливної Україніт-ПП-2, то при застосуванні останньої спостерігається зниження собівартості на 7 – 9% відносно першої.

Подальшими дослідженнями результатів отримано графіки залежності зміни собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки за варіантом № 2 в залежності від міцності порід на стискання при використанні патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2, що подано на рис. 2.



■ – Амоніт № 6 ЖВ; ▲ – Україніт-П-СА; ● – Україніт-ПП-2  
 Рис. 2. Графіки залежності зміни собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки за варіантом № 2 в залежності від міцності порід на стискання

Із графіку (рис. 2) видно, що при застосуванні патрованої ЕВР Україніт-П-СА, собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> зменшується на 10 – 12%, а при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – на 17 – 19%, відносно патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ. Це вказує на те, що на собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки істотно впливають міцність порід на стискання і параметри БПР. Якщо порівняти собівартість 1 м<sup>3</sup> виробки при використанні патрованої ЕВР Україніт-П-СА і наливної Україніт-ПП-2, то при застосуванні останньої спостерігається зниження собівартості на 7 – 9% відносно першої. Це пов'язано з меншою ціною за 1 кг наливної ЕВР Україніт-ПП-2 відносно патрованої ЕВР Україніт-П-СА, при достатньо наближених їх детонаційних характеристиках. Подальшим аналізом залежностей, які подано на рис. 1 і 2 встановлено, що собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> виробки при використанні прохідницького обладнання, до складу якого входить УБШ-227 і ППН-3А, має на 25 – 35% більші значення ніж при використанні Boomer S1D і EST-3,5.

Провівши апроксимацію максимальних значень за графіками, що подано на рис. 1 і 2, отримано загальну емпіричну формулу зміни собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> горизонтальної підготовчої виробки в залежності від міцності порід на стискання при використанні різного гірничопрохідницького обладнання із застосуванням патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2

$$C_{np} = K_{ГО} \cdot K_{ВР} \cdot e^{0,0015 \cdot \sigma_{cm}}, \text{ грн/м}^3, \quad (1)$$

де  $K_{ГО}$  – коефіцієнт, що враховує склад гірничопрохідницького обладнання, при використанні комплексу до складу якого належить бурильна установка типу УБШ та навантажувальна машина ППН-3А  $K_{ГО} = 1,0$ , при використанні комплексу до складу якого належить бурильна установка типу Boomer та вантажно-доставна машина EST-3,5  $K_{ГО} = 0,7$ ;  $K_{ВР}$  – коефіцієнт, що враховує тип ВР, для патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ  $K_{ВР} = 1160$ , для патрованої ЕВР Україніт-П-СА  $K_{ВР} = 1070$ , для наливної ЕВР Україніт-ПП-2  $K_{ВР} = 1000$ ;  $\sigma_{cm}$  – межа міцності порід на стискання  $\geq 40$  МПа.

Таким чином, визначенням економічної ефективності при проведенні гірничих виробок за допомогою ЕВР встановлено, що на собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> впливає не тільки тип ВР і гірничопрохідницьке обладнання, а і параметри БПР.

**Результати розрахунку економічної ефективності при виконанні очисних робіт.** Показники вилучення руди у більшості випадків повністю або майже повністю залежать від очисних робіт. Якщо прийняти трудові витрати на очисні роботи за 100%, то на частку безпосередньо відбивання руди припадає від 20% до 80%, що в основному залежить від прийнятої системи розробки та фізико-механічних властивостей масиву. Аналізом технологічних схем ведення очисних робіт [18], встановлено, що відбивання залізних руд на шахтах України здійснюється вертикальними шарами за допомогою висхідних віял свердловин. Отже, економічну ефективність виконання очисних робіт, а саме відбивання масиву,

можна визначати за об'ємом шару руди, що висаджується. Як відомо собівартість відбивання шару руди включає в себе розрахунок суми всіх витрат на буріння свердловин та їх заряджання ВР, що припадає на 1 т руди, але найбільш об'єктивним показником є собівартість 1 м<sup>3</sup> руди. Для отримання коректних результатів собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди необхідно визначитися з вихідними даними для розрахунку. На результати розрахунку економічної ефективності при відбивання шару руди за допомогою БПР впливають наступні вихідні дані:

– гірничо-геологічні умови, а саме параметри шару руди, що висаджується, міцність і тріщинуватість руди;

– параметри БПР, до яких відноситься діаметр, сумарна довжина та кількість свердловин у шарі руди, тип ВР, лінія найменшого опору (ЛНО) і відстань між вибоями свердловин;

– гірниче обладнання, що буде використовуватись для буріння та заряджання свердловин.

Аналізом гірничо-геологічних умов видобування залізних руд на шахтах України, встановлено, що міцність руди коливається у межах від 30 до 200 МПа. Тому для встановлення характеру зміни собівартості відбивання руди в залежності від її міцності, для розрахунку приймаємо міцність руди на стискання 60, 120 і 180 МПа. Подальшим аналізом виробничої діяльності шахт встановлено, що відбивання руди здійснюється свердловинами діаметром 0,089 – 0,11 м шарами шириною 15 – 30 м і висотою 20 – 35 м. Довжина шару руди, що відбивається, дорівнює величині ЛНО. Параметри БПР розраховуються за зоною інтенсивного подрібнення та спільної дії зарядів [13] для вище наведеної міцності руд із використанням розсипної ВР Грамоніт 79/21, безтритилової ВР Україніт-АНФО і наливної ЕВР Україніт-ПП-2, з урахуванням фізико-механічних властивостей масиву та детонаційних характеристик ВР.

Аналізом використання бурових верстатів і зарядних машин, які застосовуються при відбиванні руди в умовах залізрудних шахт України, встановлено, що шахтами Криворізького басейну для буріння свердловин використовують бурові верстати НКР-100 МПа і у поодиноких випадках Simba і DL. Заряджання свердловин розсипною ВР Грамоніт 79/21 або безтритиловою ВР Україніт-АНФО здійснюється за допомогою зарядної машини МТЗ-3, а наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – ПЗМК-500. В умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» навпаки, в основному для буріння свердловин використовується буровий верстат Simba і DL, і у поодиноких випадках верстат НКР-100 МПа. Для заряджання свердловин розсипною ВР Грамоніт 79/21 або безтритиловою ВР Україніт-АНФО використовується зарядна машина МТЗ-3, а наливною ЕВР Україніт-ПП-2 – RTCh-23, і у деяких випадках ПЗМК-500.

На підставі виконаного аналізу виробничої діяльності залізрудних шахт в області очисних робіт визначимося з вихідними даними для розрахунку собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди. Розрахунок собівартості відбивання масиву виконували для двох варіантів із застосуванням різного бурового і зарядного обладнання з використанням розсипної ВР Грамоніт 79/21, Україніт-АНФО і наливної ЕВР Україніт-ПП-2 для руди міцністю на стискання 60, 120 і 180 МПа. Вихідні дані

для варіанту № 1: площа поперечного перерізу бурової виробки – 12 м<sup>2</sup>, розміри шару руди, що відбивається, ширина – 20 м і висота – 25 м; міцність руди на стискання – 60, 120 і 180 МПа, коефіцієнт структурного ослаблення масиву –  $K_c = 0,5$ , діаметр свердловини – 0,105 м, розсипна ВР – Грамоніт 79/21 щільністю 1000 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 3600 м/с, безтритилова ВР Україніт-АНФО щільністю 950 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 3800 м/с та наливна ЕВР Україніт-ПП-2 густиною 1000 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 4900 м/с, буровий верстат – НКР-100 МПА, зарядна машина – МТЗ-3 і ПЗМК-500. Вихідні дані для варіанту № 2: площа поперечного перерізу бурової виробки – 12 м<sup>2</sup>, розміри шару руди, що відбивається, ширина – 20 м і висота – 25 м; міцність руди на стискання – 60, 120 і 180 МПа, коефіцієнт структурного ослаблення масиву –  $K_c = 0,5$ , діаметр свердловини – 0,102 м, розсипна ВР – Грамоніт 79/21 щільністю 1000 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 3600 м/с, безтритилова ВР Україніт-АНФО щільністю 950 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 3800 м/с та наливна ЕВР Україніт-ПП-2 густиною 1000 кг/м<sup>3</sup> і швидкістю детонації 4900 м/с, самохідний буровий верстат – Simba H1254, зарядна машина – МТЗ-3 і RTCh-23. Розрахунок трудомісткості робіт з буріння свердловин, їх зарядження та підривання, а також визначення витрат енергії та матеріалів за варіантами виконували за формулами, що подано у роботі [11].

У якості прикладу проаналізуємо зміну собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди за варіантом № 1 в залежності від міцності руди на стискання при використанні розсипної ВР Грамоніт 79/21, безтритилової ВР Україніт-АНФО та наливної ЕВР Україніт-ПП-2, що подано на рис. 3.

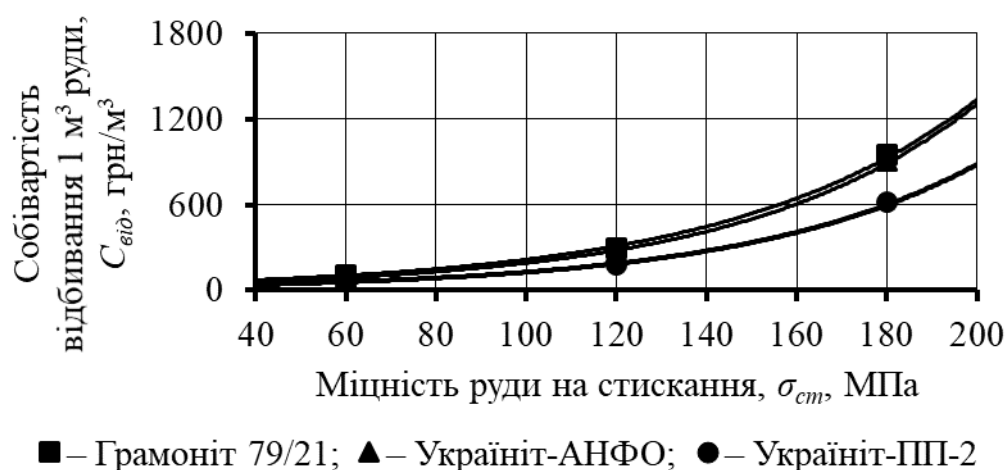


Рис. 3. Графіки залежності зміну собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди за варіантом № 1 в залежності від міцності руди на стискання

Як видно з графіку (рис. 3), при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 та при використанні бурового верстату НКР-100 МПА і зарядної машини ПЗМК-500, собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди міцністю 60 – 180 МПа зменшується на 48%, відносно використання розсипної ВР Грамоніт 79/21, бурового верстату НКР-100 МПА та зарядної машини МТЗ-3. Порівнянням з використанням безтритилової ВР Україніт-АНФО, бурового верстату НКР-100 МПА та зарядної машини МТЗ-3 встановлено, що при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 та



при використанні бурового верстату НКР-100 МПа і зарядної машини ПЗМК-500, собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди міцністю 60 – 180 МПа зменшується на 32%. Це вказує на те, що на собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди істотно впливають міцність руди на стискання, гірниче обладнання та параметри БПР.

Провівши апроксимацію максимальних значень за залежностями, що подано на рис. 3, отримано загальну емпіричну формулу зміни собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди в залежності від міцності руди на стискання при використанні бурового верстата НКР-100 МПа та зарядних машин МТЗ-3 і ПЗМК-500:

$$C_{від} = K_{BP} \cdot e^{0,019 \cdot \sigma_{ст}}, \text{ грн/м}^3, \quad (2)$$

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  $K_{BP} = 20$ .

Подальші дослідження результатів дозволили побудувати графіки залежності зміни собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди за варіантом № 2 в залежності від міцності руди на стискання при використанні розсипної ВР Грамоніт 79/21, безтритилової ВР Україніт-АНФО та наливної ЕВР Україніт-ПП-2, що подано на рис. 4.

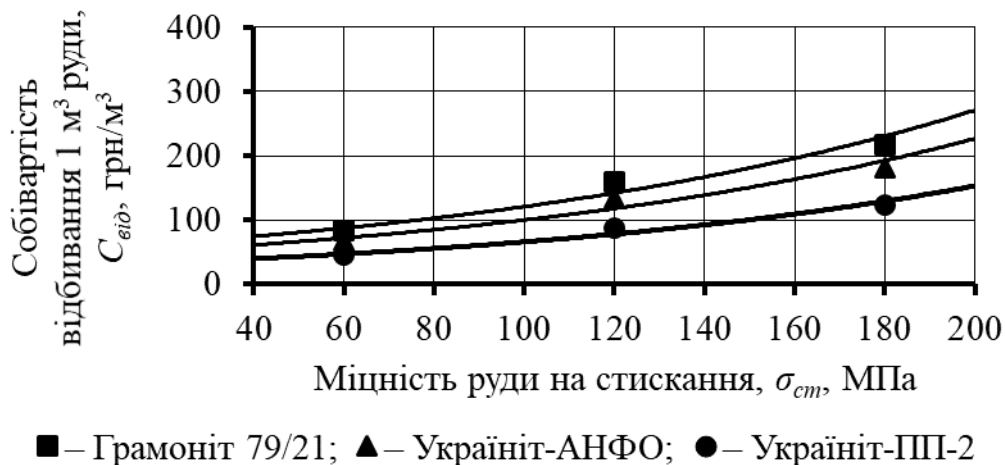


Рис. 4. Графіки залежності зміни собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди за варіантом № 2 в залежності від міцності руди на стискання

Як видно з графіку (рис. 4), при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 та при використанні бурового верстату Simba і зарядної машини RTCh-23 собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди міцністю 60 – 180 МПа зменшується на 46%, відносно використання розсипної ВР Грамоніт 79/21, бурового верстату Simba і зарядної машини МТЗ-3. Порівнянням з використанням безтритилової ВР Україніт-АНФО, бурового верстату НКР-100 МПа та зарядної машини МТЗ-3 встановлено, що при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 та при використанні бурового верстату Simba і зарядної машини RTCh-23, собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди міцністю на стискання 60 – 180 МПа зменшується на 32%. Це вказує на те, що на собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди істотно впливають міцність руди на стискання, комплекси гірничого обладнання та параметри БПР.

Провівши апроксимацію максимальних значень, що подано на рис. 4, отримано загальну емпіричну формулу зміни величини собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди в залежності від міцності руди на стискання при використанні бурових верстатів Simba та зарядних машин МТЗ-3 і RTCh-23:

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

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

Таким чином, визначенням економічної ефективності при відбиванні руди за допомогою ЕВР встановлено, що на собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди впливає не тільки тип ВР і гірниче обладнання, а і параметри БПР.

**Екологічна оцінка використання ЕВР при видобуванні руди підземним способом.** Як відомо, після проведення підривних робіт, що пов'язані з підземним видобуванням руди, забруднене повітря з шахт надходить без очищення у атмосферу через вентиляційні стволи, тому, що дотепер не існує ефективного обладнання для вловлювання та нейтралізації газів, які викидаються в значних обсягах. Протягом 2006 – 2010 рр. проведено виміри концентрації шкідливих газів у пробах повітря навколо вентиляційних стволів шахт ПрАТ «ЗЗРК» та розраховано розподіл приземних концентрацій сумарного впливу. З 2009 по 2011 рік досліджено токсико-мутагенну активність атмосферного повітря навколо джерел викиду за допомогою тесту «стерильність пилку рослин». Для визначення техногенного впливу на процеси онтогенезу озимої пшениці у 2011 році виконувались дослідження значень величин лінійних розмірів і вагових показників пшениці поблизу вентиляційних стволів, а також виконувався аналіз значень величин біологічних ознак пророслих зерен пшениці [19].

Аналізом результатів досліджень встановлено, що рудникове повітря, яке надходить у атмосферу з вентиляційних стволів, негативно впливає на розвиток як вищих рослин, так і зернових культур. Зі збільшенням відстані від джерела викиду, вплив рудникового повітря на флору знижується. Проведеними у 2016 році дослідженнями за допомогою фізико-хімічного аналізу та біологічної оцінки стану атмосферного повітря встановлено зниження концентрації шкідливих речовин, що виділяються в атмосферне повітря при веденні БПР за допомогою ЕВР [20, 21]. На основі запропонованої методики у 2017 – 2018 рр. виконано розрахунки і проведено екологічну оцінку стану атмосферного повітря навколо шахтних вентиляційних стволів [12, 22]. Це дозволило встановити залежність зменшення техногенного впливу на атмосферне повітря та зниження індексу екологічної небезпеки до 35%.

Тому виникає науково-практичний інтерес у встановленні техногенного впливу та індексу екологічної небезпеки на атмосферне повітря при зростанні обсягів річного споживання ЕВР і безтротилових ВР до 78% від загальних річних витрат ВР. Для екологічної оцінки використання ЕВР шахтами ПрАТ «ЗЗРК» при видобуванні залізної руди виконували порівняння зміни концентрації шкід-

ливих газів при використанні 100% тротиловмісних ВР у 2008 році, та при використанні 22% тротиловмісних ВР і 78% ЕВР типу «Україніт» у 2020 році. Після чого виконували розрахунок зміни індексу екологічної небезпеки, що дозволить встановити екологічну оцінку використання ЕВР типу «Україніт» в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК».

Аналізом значень приземних концентрацій екологічно небезпечних речовин встановлено, що максимальна концентрація екологічно небезпечних речовин оксиду вуглецю та оксиду і діоксиду азоту була у 2008 році, коли протягом року на підземних гірничих роботах використовували 100% тротиловмісних ВР. При використанні протягом 2020 року 78% ЕВР типу «Україніт» і 22% тротиловмісних ВР від загальних витрат ВР, значення максимальних концентрацій екологічно небезпечних речовин у порівнянні з 2008 роком знизились, для оксиду вуглецю в 5,0 – 5,5 разів, а оксиду і діоксиду азоту в 1,2 – 1,3 рази. Це вказує на те, що при використанні на підземних гірничих роботах ЕВР типу «Україніт» призводить до зменшення концентрацій екологічно небезпечних речовин та знижує техногенне навантаження на атмосферне повітря.

Визначення рівня екологічної небезпеки виконували за допомогою методики, що подано у роботах [12, 23]. Результатами розрахунку зміни індексу небезпеки від відстані до джерела викиду встановлено, що при використанні у 2008 році 100% тротиловмісних ВР спостерігаються найбільші значення коефіцієнтів та індексів небезпеки для всіх екологічно небезпечних речовин. При використанні в умовах ПрАТ «ЗЗРК» у 2020 році 78% ЕВР типу «Україніт» і 22% тротиловмісних ВР від загальних річних витрат ВР встановлено 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 100% тротиловмісних ВР. Також спостерігається зменшення індексу небезпеки у середньому в 1,5 рази при використанні ЕВР «Україніт», у порівнянні з використанням тротиловмісних ВР, що складає зниження індексу екологічної небезпеки до 36% [24]. Це вказує, що використання ЕВР типу «Україніт» при підземному видобуванні руд призводить до зменшення концентрацій екологічно небезпечних речовин оксиду вуглецю та оксиду і діоксиду азоту, що утворюються після підіривних робіт, та дозволяє знизити техногенне навантаження на атмосферне повітря.

### **Висновки.**

1. Результатами розрахунку економічної ефективності при проведенні гірничих виробок за допомогою ЕВР встановлено, що на значення собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> виробки впливає не тільки тип ВР і гірничопрохідницьке обладнання, а і параметри БПР. Аналізом значень собівартості проведення 1 м<sup>3</sup> при використанні вітчизняного та закордонного гірничого обладнання, встановлено, що при застосуванні патрованої ЕВР Україніт-П-СА, собівартість проведення 1 м<sup>3</sup> зменшується у середньому до 11%, а при застосуванні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 – до 18%, відносно патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ. Дослідженнями зміни собівартості проведення горизонтальної підготовчої виробки в залежності від міцності порід на стискання встановлено загальну експонентну залежність

визначення собівартості 1 м<sup>3</sup> виробки в залежності від міцності порід при використанні вітчизняного та закордонного прохідницького обладнання із застосуванням патрованої ВР Амоніт № 6 ЖВ та ЕВР Україніт-П-СА, а також наливної ЕВР Україніт-ПП-2.

2. Визначенням економічної ефективності при виконанні очисних робіт за допомогою ЕВР встановлено, що на собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди впливає не тільки тип ВР і гірниче обладнання, а й параметри БПР. Порівнянням значень собівартості відбивання руди при застосуванні різних бурових верстатів та зарядних машин встановлено, що при використанні наливної ЕВР Україніт-ПП-2 собівартість відбивання 1 м<sup>3</sup> руди зменшується у середньому до 48% відносно розсипної ВР Грамоніт 79/21, а відносно безтротилової ВР Україніт-АНФО – до 32%. Отримано експонентні залежності визначення собівартості відбивання 1 м<sup>3</sup> руди при застосуванні різних бурових верстатів та зарядних машин із використанням розсипної ВР Грамоніт 79/21, безтротилової ВР Україніт-АНФО і наливної ЕВР Україніт-ПП-2.

3. Екологічною оцінкою використання ЕВР при 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 ВР призвело 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 100% тротиловмісних ВР. Це призвело до зменшення індексу небезпеки у середньому в 1,5 рази (до 36%) при використанні ЕВР «Україніт», у порівнянні з використанням тротиловмісних ВР. Використання ЕВР типу «Україніт» при підземному видобуванні руд призводить до зменшення концентрацій екологічно небезпечних речовин оксиду вуглецю та оксиду і діоксиду азоту, що утворюються після підривних робіт, і дозволяє знизити техногенне навантаження на атмосферне повітря.

#### Перелік посилань

1. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260.  
<http://doi.org/10.1201/b17547-45>
2. Mertuszka, P., & Kramarczyk, B. (2018). The impact of time on the detonation capacity of bulk emulsion explosives based on Emulinit 8L. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 43(8), 799-804.  
<https://doi.org/10.1002/prep.201800062>
3. Mertuszka, P., Fuławka, K., Pytlik, M., & Szastok, M. (2019). The influence of temperature on the detonation velocity of selected emulsion explosives. *Journal of Energetic Materials*, 38(3), 336–347.  
<https://doi.org/10.1080/07370652.2019.1702739>
4. Mertuszka, P., Cenian, B., Kramarczyk, B., & Pytel, W. (2018). Influence of explosive charge diameter on the detonation velocity based on Emulinit 7L and 8L bulk emulsion explosives. *Central European Journal of Energetic Materials*, 15(2), 351-363.  
<https://doi.org/10.22211/cejem/78090>
5. Gorova, A., Pavlychenko, A., & Kholodenko, T. (2013). Prospects for the bioindication methods implementation in the environmental management system of industrial enterprises. *Annual Scientific-Technical Colletion – Mining of Mineral Deposits*, 83-84.  
<http://doi.org/10.1201/b16354-15>

6. Kholodenko, T., Ustimenko, Y., Pidkamenna, L., & Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
7. Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebohin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 95-102. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>
8. Lyashenko, V. I., Golik, V. I., & Dyatchin, V. Z. (2020). Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 63(7), 529-538. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-529-538>
9. Krysin, R.S., Ishchenko, N.I., Klimenko, V.A., Piven, V.A., & Kuprin, V.P. (2004). Explosive ukrain-PM-1: Equipment and fabrication technology. *Gornyi Zhurnal*, (8), 32-37.
10. Gurin, A.A., & Lyashenko, V.I. (2018). Improvement of the Assessment Methods of the Effect of Mass Emissions in Pits on the Environment. *Occupational Safety in Industry*, (1), 35-41. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-1-35-41>
11. Khomenko, O., Kononenko, M., & Savchenko, M. (2018). *Technology of underground mining of ore deposits*. Dnipro: DUT. <https://doi.org/10.33271/dut.001>
12. Khomenko, O., Kononenko, M., & Myronova, I. (2017). Ecological and technological aspects of iron-ore underground mining. *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 59-67. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.059>
13. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 111-123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
14. Kononenko, M., Khomenko, O., Savchenko, M., & Kovalenko, I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 22-30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
15. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Savchenko, M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
16. Kononenko M., Khomenko O. (2021). Mathematic simulation for the rock mass destruction by blasting. *Physical and Chemical Geotechnologies*, 27-37. <https://doi.org/10.15407/pcgt.21.05>
17. Vladyko, O., Kononenko, M., & Khomenko, O. (2012). Imitating modeling stability of mine workings. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 147-150. <https://doi.org/10.1201/b13157-26>
18. Kononenko, M., Khomenko, O., Kovalenko, I., & Savchenko, M. (2021). Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 69–75. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
19. Myronova, I. (2015). Changing of biological traits of winter wheat that vegetate near emission source of iron-ore mine. *Mining of Mineral Deposits*, 9(4), 461-468. <https://doi.org/10.15407/mining09.04.461>
20. Myronova, I. (2015). The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments In Mining Engineering 2015*, 193-197. <https://doi.org/10.1201/b19901-35>
21. Mironova, I., & Borysovs'ka, O. (2014). Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 333-339. <https://doi.org/10.1201/b17547-57>

22. Khomenko, O., Kononenko, M., Myronova, I., & Sudakov, A. (2018). Increasing ecological safety during underground mining of iron-ore deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 29-38.  
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/3>
23. Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71.  
<https://doi.org/10.15407/mining10.02.0064>
24. Kononenko, M., Khomenko, O., Myronova, I., & Kovalenko, I. (2022). Economic and environmental aspects of using mining equipment and emulsion explosives for ore mining. *Mining Machines*, 40(2), 88-97.  
<https://doi.org/10.32056/komag2022.2.4>

### ABSTRACT

**Purpose.** Establishment of economical-ecological efficiency of the use of emulsion explosives (EEX) in underground mining of ores using various mining equipment.

**The methodology of research.** Using the correlation-regression analysis of the obtained calculated data, exponential dependences of the cost of carrying out 1 m<sup>3</sup> of horizontal development drift and breaking were established depending on the compressive strength of the ore or rock, the type of explosive (EX) and mining equipment. The calculation of the level of ecological hazard in the conditions of the mines of the Private Joint Stock Company "Zaporiz'kyy Iron Ore Plant" (PJSC "ZIOP") was carried out using a technique that is negatively affected by pollutants released during the use of (EX).

**Findings.** The calculation of economic efficiency in the place driving of development drifts with the use of different mining equipment and types of (EX) has been carried out. A general exponential dependence is established for determining the cost of carrying out 1 m<sup>3</sup> of a mine working, depending on the compressive strength of rocks when using various types of (EX) and tunneling equipment. The calculation of the economic efficiency of stoping with the help of various complexes of mining equipment and types of (EX) has been made. The exponential dependences of determining the cost of breaking 1 m<sup>3</sup> of ore were obtained using various drilling rigs and shot loaders using different types of (EX). An ecological assessment of the use in the conditions of an iron ore mine established a decrease in the concentration of ecological hazardous substances and a decrease in the coefficients of ecological hazard, which led to a decrease in the technogenic load on the atmospheric air.

**The originality.** The cost of carrying out 1 m<sup>3</sup> of horizontal development drift and breaking varies exponentially depending on the compressive strength of the ore or rock, the type of (EX) and mining equipment, with the help of which the economic efficiency of the use of (EEX) in underground ore mining.

**Practical implications.** The results of the research were obtained empirical dependences of the cost of carrying out 1 m<sup>3</sup> of horizontal development drift and breaking on the compressive strength of ore or rocks using domestic and foreign mining equipment, which make it possible to calculate the economic efficiency of using cartridge or bulk (EX) in underground ore mining.

**Keywords:** *iron ore, emulsion explosive, mining equipment, economic efficiency, ecological assessment.*