ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.271 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.145

© Д.А. Тітов[1]
[1]Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНЬОКАР'ЄРНИХ ПРИБОРТОВИХ НАСИПІВ ПІДРИВАННЯМ НА СКИД

D. Titov[1] https://orcid.org/0000-0002-0637-2329
[1]Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

TECHNOLOGICAL ASPECT OF FORMING INTERNAL OPEN PITS EDGE EMBANKMENT BY EJECTION BLASTING

Мета дослідження полягає в аналізі ефективності традиційної технології формування на бортах відпрацьованих ділянок кар'єру внутрішніх відвалів або техногенних родовищ, та формулюванні принципово нового інженерного рішення даної проблеми шляхом використання поетапного підривання насипу масовими вибухами спрямованої дії на скид.

Методика. У процесі досліджень використано комплексний аналіз функціональної значимості технологічних складових формування внутрішньокар'єрних насипів на відпрацьованих бортах кар'єру для наступного теоретичного обґрунтування їх параметрів. Для визначення просторових характеристик технологічних компонентів застосовано графоаналітичний метод з побудовою компонувальних схем та конструктивних рішень в залежності від змінних геогенних та техногенних умов.

Результати. На підставі визначених в оглядовому аналізі недоліків традиційних технологій внутрішньокар'єрного відвалоутворення в залізорудних кар'єрах запропоновано новий конструктивно-методологічний підхід щодо формування на їх кінцевих проєктних бортах штучних насипів різного призначення. При цьому наводяться основні структурно-функціональні особливості пропонованої технології та аргументи щодо доцільності її упровадження в глибоких кар'єрах на етапі їх доробки. Враховано й обґрунтовано реальність застосування розроблених пропозицій та наведено повну матеріально-технічну і конструктивно-елементну доступність усього необхідного для цього в Україні.

Наукова новизна. Вперше запропоновано й системно аргументовано комплекс передумов, необхідних для аналітичного та графічного обґрунтування нової технології формування на погашених бортах насипів суцільним уступом від верхнього до нижнього контуру кар'єру з урахуванням обов'язкового дотримання норм безпеки робіт, сейсмічних наслідків та екологічної прийнятності. Наведено загальну структуру й описано алгоритм планованих теоретичних досліджень та їх експериментальної перевірки.

Практична значимість. Пропонована технологія є перспективною до впровадження на більшості глибоких кар'єрів Кривбасу. Актуальність її зумовлюється тим, що, після 2040 року більшість гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу почнуть виводити свої кар'єри з експлуатації. А так як процес цей відбуватиметься поступово, кар'єри розташовані відносно близько, а земельні площі під відвали – практично вичерпані, переміщення пустих порід з діючих кар'єрів у відпрацьовані стає практично єдиним реальним рішенням проблеми й іншої альтернативи цьому наразі немає.

Ключові слова: *кар'єр, борт кар'єру, уступи, берми, внутрішній відвал, підривний тунель, спрямоване підривання, вибух на скид.*

Вступ. На сьогоднішній день головною тенденцією більшості гірничозбагачувальних комбінатів є невпинне наближення їхніх кар'єрів до кінцевих проєктних контурів [1], що зумовлює поступове зниження на завершальному етапі виробничої потужності по руді, зростання коефіцієнту розкриву, а головне – значних обсягів нетипових для попередніх етапів робіт, безпосередньо або опосередковано пов'язаних з наступною рекультивацією, серед яких найскладнішими й найвитратнішими є:

1) кінцеве контурне підривання укосів бортів для надання їм гарантовано безпечного стійкого стану на тривалий період;

2) розміщення кінцевих обсягів розкриву, об'єми яких співвідносяться з об'ємами видобутої за цей час руди переважно – обернено пропорційно.

За цих умов найбільшою мірою актуалізуються проблеми удосконалення буропідривнх робіт (БПР), оскільки останні багато разів продемонстрували свої унікальні можливості, не тільки як засіб найдешевшої підготовки скельних порід до виймання, але й при переміщенні колосальних їх об'ємів під час реалізації наймасштабніших у світі геоландшафтних проєктів, прикладом чого є устрій дамби у Казахстані – гребля в урочищі Медео висотою близько 100 м, шириною зверху ≈ 100 і внизу ≈ 500 м. Вибух першої черги: маса ВР ≈ 5000 т і другої ≈ 4000 т. В результаті вибухів було відбито і скинуто в тіло греблі близько 3 млн м^3 скельних порід (1,6 млн м^3 першим і 1,4 млн м^3 другим) [2]. Але наразі такі можливості майже виключно застосовуються в геобудівельних технологіях, не зважаючи на те, що навіть самий загальний факторно-оціночний аналіз переконливо свідчить про очевидну доцільність уведення методів вибухового переміщення породних масивів у технології гірничодобувні.

Аналіз попередніх досліджень. Інформаційний аналіз проблем використання вибухових технологій у гірництві переконливо свідчить про те, що абсолютна більшість досліджень у даному напрямі стосується удосконалення процесів руйнування скельних гірських порід з метою керування гранулометричним складом підірваної гірничої маси [3, 4]. Стосовно переміщення породних мас під час вибуху, стверджується, що дане явище є вкрай шкідливим, так як зумовлює непродуктивні втрати енергії вибуху, також як і нагрівання руйнованого середовища [5]. Цільове ж застосування зумовленого вибухом руху породи більш характерним є для технологій будівельних щодо земляних робіт, особливо – під час будівництва дамб, автомобільних доріг і залізниць [6]. У гірництві застосування означеного використання вибуху носить здебільшого фрагментарний характер. При цьому практика переважно полягає в проєктуванні вибухів на переміщення порід (викид та скид) для розкриття покладів корисних копалин [7, 8], а теоретичні дослідження головним чином зосереджуються на процесах безтранспортного улаштування різного роду траншей та котлованів [9, 10].

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Загалом, аналіз розглянутих спеціалізованих публікацій свідчить про досить обмежене висвітлення досліджень, присвячених науковому забезпеченню переміщення породних мас вибухом у типово гірничих технологіях, конкретно – відкритих гірничих робіт, включаючи рекультивацію залізорудних кар'єрів, для яких характерними є особливо крупномасштабні вироблені простори у сполученні з потоками мільйонів кубометрів мінеральних відходів та техногенної сировини.

Невирішеність проблеми швидкого й одночасно спрощеного узгодження розміщення значних розкривних або техногенних мас із засипкою відпрацьованих кар'єрів за доцільними економічними критеріями актуалізує й мотивує дане дослідження, головною метою якого є виділення й узагальнення передумов обґрунтування технології формування внутрішньокар'єрних насипів (відвалів, техногенних покладів тощо) та оцінка реальності й доцільності її застосування в залізорудних кар'єрах. Саме ці два фактори найбільшою мірою зумовили напрям частково представлених нижче досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технологія внутрішнього відвалоутворення в цілому розроблена досить добре, однак, залишається ряд невирішених питань, пов'язаних із забезпеченням ефективності й безпеки робіт при інтенсивному засипанні глибоких кар'єрів одноярусними відвалами з верхнього їх контуру суцільним насипом, з використанням високопродуктивного транспорту та потужних спеціалізованих машин і комплексів для формування масивних насипів з сипкого матеріалу, в якості яких можуть застосовуватись великі драглайни, відвальні мости або консольні відвалоутворювачі. Останні два з яких набувають доцільності за наявності в кар'єрі магістральних конвеєрів, типових для більшості залізорудних кар'єрів, обладнаних конвеєрними мережами на бортах або комплексами циклічно-потокової технології (ЦПТ).

За цих умов суть проблеми полягає не в укладанні безпосередньо насипу на борту кар'єра на всю його глибину, досвіду чого у вітчизняній і світовій практиці – достатньо, і не в безпеці даного процесу, що вирішується за рахунок обладнання з подовженими стрілами та консолями, а головним чином – в простому, швидкому й безпечному перерозподілі породних об'ємів у масиві, відсипаному за максимальної відстані розвантаження того чи іншого виду відвалоутворювача. Разом з тим відомі й приклади вкрай технологічно спрощеного бульдозерного формування такого типу насипів, але вони є надзвичайно ризикованими, лежать за межами допустимих норм, тому нами не розглядаються.

Радикальним вирішенням існуючої проблеми могло б слугувати використання абзетцерів (рис. 1).

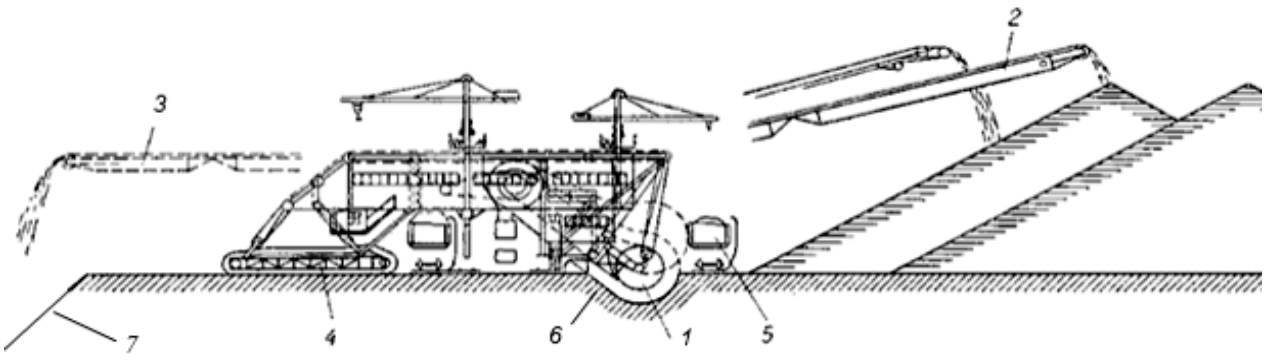


Рис. 1. Схема дії абзетцера: 1 – забірний пристрій; 2 – відвальна консоль (положення при верхньому відсипанні відвалу; 3 – положення консолі при нижньому відсипанні; 4 – черпакова рама для планування відвалу; 5 –думпкар під розвантаженням; 6 – приймальний приямок; 7 – борт кар'єру

Однак, враховуючи високу вартість абзетцерних комплексів, складність їх транспортування, монтажу й високу енерговитратність, а також відносно невеликий термін експлуатації, практичне їх застосування стає недоцільним на більшості ГЗК, навіть незважаючи на наявність дешевих пропозицій таких надійних і потужних абзетцерів як, наприклад, TAKRAF виробництва ФРН, з відпрацьованих наразі кар'єрів. Але разом з тим в наявності є драглайни українського виробника НКМЗ – ЕШ-11/70 (ковш – 11 м³, стріла – 70 м) й ін.

Найбільш прийнятними й реальними способами формування внутрішніх відвалів і техногенних покладів в кар'єрах ГЗК за даних умов, на наше переконання, є кероване зсування під дією вибуху або гідророзмиву нижніх шарів відсипаної зони гідромоніторами. При цьому забезпечення керованого зсуву насипу можливе різними способами (рис. 2).

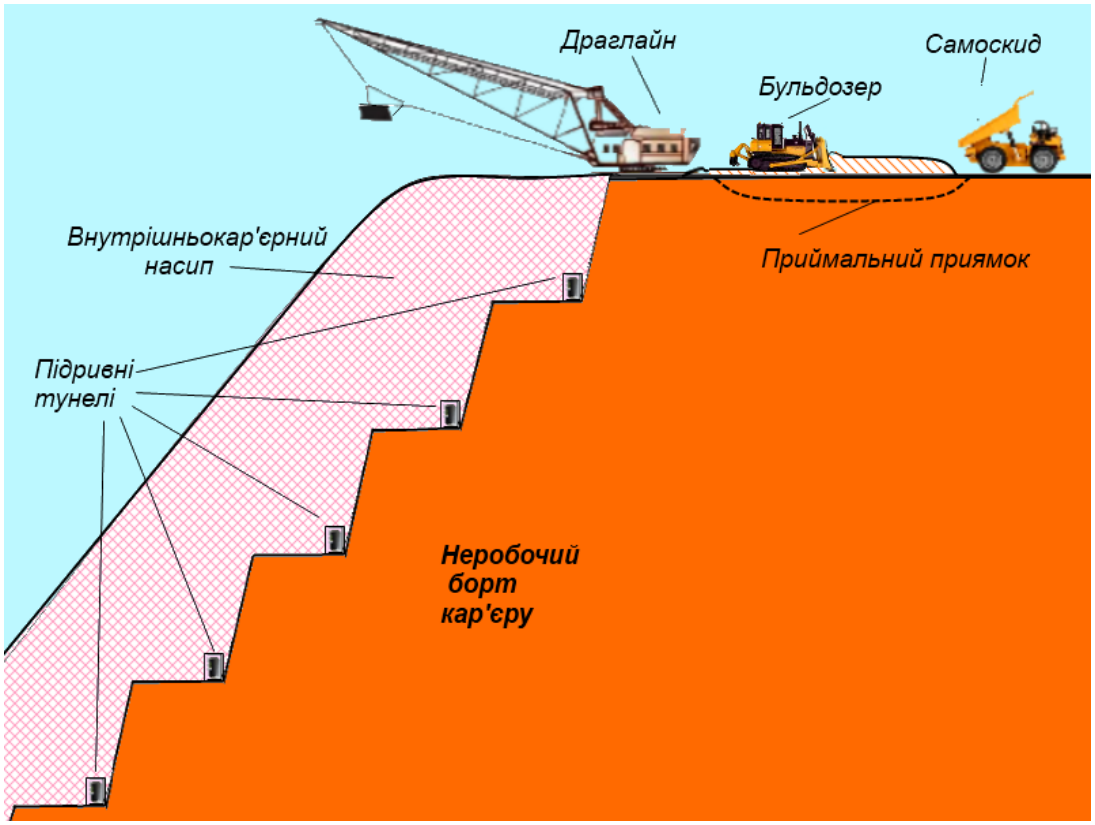


Рис. 2. Схема внутрішньокар'єрного насипу з використанням драглайну та устроєм на бермах борту підривних тунелів для розміщення зарядів на викид

За нашою пропозицією (див. рис. 2) при плановій засипці кар'єру може бути доцільним передуюче створення лінійних тюбінгових зарядних порожнин-тунелів шляхом монтажу їх на бермах борту для формування в них у подальшому камерних зарядів. За нашими розрахунками найбільш прийнятними для розглянутих завдань з переліку типових залізобетонних виробів заводів Придніпровського регіону є ланки прямокутних труб [11], тому ми й розглядаємо їх для прикладу, зауважуючи, що пропозиція аналогічної продукції – значна. Основні характеристики типових повнопрофільних збірних залізобетонних елементів-тюбінгів з бетону марки 400М/Б30, які частіше називають ланками З/Б труб прямокутного перерізу (рис. 3), наведено в табл. 1, де розміри подані в сантиметрах: *l* – довжина, *b* – ширина, *h* – висота.

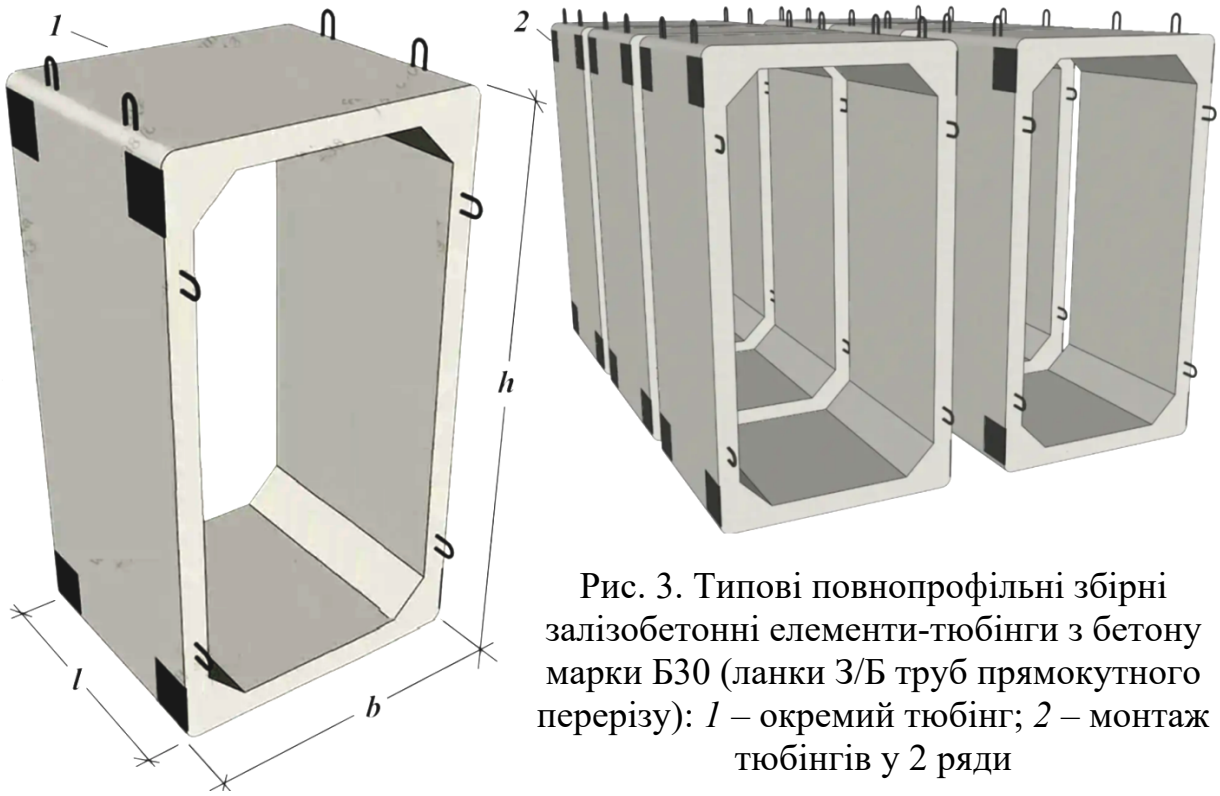


Рис. 3. Типові повнопрофільні збірні залізобетонні елементи-тюбінги з бетону марки Б30 (ланки З/Б труб прямокутного перерізу): *1* – окремий тюбінг; *2* – монтаж тюбінгів у 2 ряди

Таблиця 1

Основні характеристики типових збірних залізобетонних елементів-тюбінгів

Марка	Розміри: $l \times b \times h$	Марка	Розміри: $l \times b \times h$	Марка	Розміри: $l \times b \times h$	Марка	Розміри: $l \times b \times h$
ЗП1.100	122×100×172	ЗП6.100	149×100×190	ЗП11.100	226×100×246	ЗП16.100	332×100×249
ЗП1.200	122×200×172	ЗП6.200	149×200×190	ЗП11.200	226×200×246	ЗП17.100	340×100×308
ЗП2.100	122×100×176	ЗП7.100	174×100×230	ЗП12.100	232×100×264	ЗП18.100	346×100×326
ЗП2.200	122×200×176	ЗП7.200	174×200×230	ЗП12.200	232×200×264	ЗП19.100	436×100×306
ЗП3.100	122×100×184	ЗП8.100	174×100×240	ЗП13.100	276×100×240	ЗП20.100	442×100×310
ЗП3.200	122×200×184	ЗП8.200	174×200×240	ЗП13.200	276×200×240	ЗП21.100	460×100×330
ЗП4.100	149×100×176	ЗП9.100	180×100×250	ЗП14.100	284×100×252	ЗП22.100	122×100×222
ЗП4.200	149×200×176	ЗП9.200	180×200×250	ЗП14.200	284×200×252	ЗП23.100	149×100×226
ЗП5.100	149×100×182	ЗП10.100	226×100×234	ЗП15.100	290×100×174	ЗП24.100	174×100×280
ЗП5.200	149×200×182	ЗП10.200	226×200×234	ЗП15.100	290×200×174	ЗП25.100	226×100×284

Як видно з даної таблиці, наведені номенклатура й обсяги завжди доступної продукції, необхідної для монтажу головних складових пропонованої технології – підривних тунелів – переконливо свідчать про повну потенційну забезпеченість збірними залізобетонними конструкціями монтажу останніх в разі прийняття рішення про відповідне впровадження. І це стосується не тільки гарантованості матеріально-елементного забезпечення такого гірничого проєкту, але й дозволяє коригувати параметри його в широкому діапазоні, оскільки розглянуті елементи – за вимогою замовника – широко модифікуються (нерідко – без подорожчання), як в частині будови (форм, пропорцій, додаткових отворів, закладних і монтажних деталей тощо), так і несучої здатності (зміни марки бетону, армування тощо). Усе це має надзвичайно важливе значення, оскільки дозволяє оперативно коригувати ті чи інші проєктні рішення, чим суттєво підвищує їх адаптивні можливост, що в умовах великомасштабних промислових експериментів набуває особливої цінності. Значною є й пропозиція Б/У ланок.

Подібні армовані залізобетонні оболонки створюють додаткові можливості в керуванні вибухом, але разом з тим вони є доволі складними щодо розрахунків [12], особливо стосовно забезпечення заданого руйнування армокаркасів, тому нами цілеспрямовано для даних цілей розроблено ряд конструкцій комбінованих зарядів з розділеними ВР різної бризантності, які наразі патентуються.

Формування насипу реалізується наступним чином. Уздовж борта на бермах кар'єру монтуються тюбінги із закладними деталями, які з'єднуються між собою електрозварюванням в тунель, що обваловується й укріплюється (рис. 4) за допомогою легкого бульдозера й екскаватора з метою захисту від ударів кусками породи, що скочуються по борту кар'єра при засипці його драглайном або консольним відвалоутворювачем, у разі застосування потокової технології.

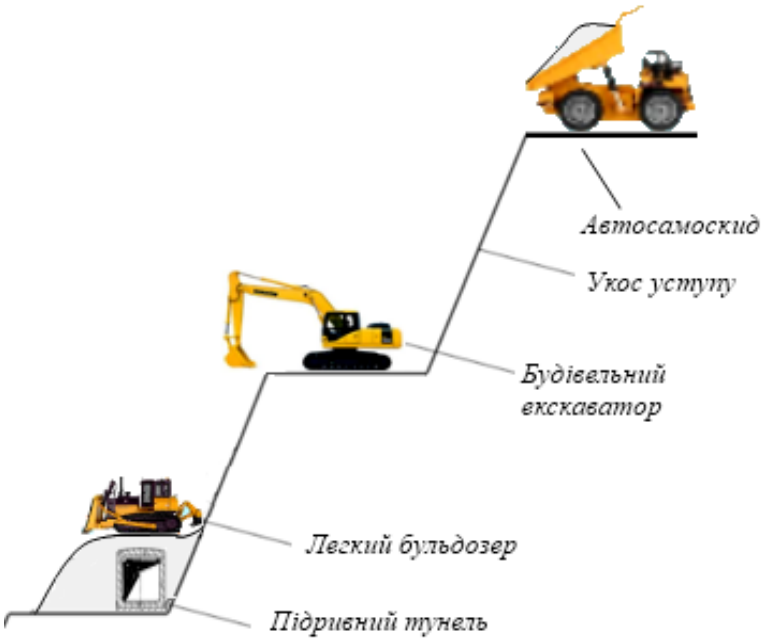


Рис. 4. Схема захисного обваловування підривного тунелю

За досягнення насипом затопленої зони, кут його природного укосу знижується. По досягненні відсипаним шаром розрахункових параметрів, ініціюють ярус камерних зарядів у нижньому тунелі. Це зумовлює викид прилеглої породи та формування в донній (затопленій) частині кар'єру стійкої підпірної призми зі зменшеним кутом укосу (див. табл. 1). Після стабілізації масиву продовжують відсипку першої заходки, використовуючи новоутворену ємність, що виникла внаслідок сповзання порід. Бульдозер відновлює робочу площу до граничних безпечних відстаней. Технологічний цикл повторюють послідовно для кожного ярусу зарядних порожнин у напрямі знизу-догори.

По завершенню етапу формування насипного шару на повну висоту і товщину важкий бульдозер планує й ущільнює площадку на поверхні насипу, профілює її відповідно до вимог безпеки і типу та робочих параметрів основного екскаватора – драглайна чи відвалоутворювача, після чого здійснюється переукладання під'їзних шляхів, вантажних рамп, конвеєрів тощо.

Надалі переміщується обладнання відвального комплексу та починається відсипка наступної заходки. При цьому відсипання шару здійснюється послідовно за декілька фаз, як показано на рис. 5.

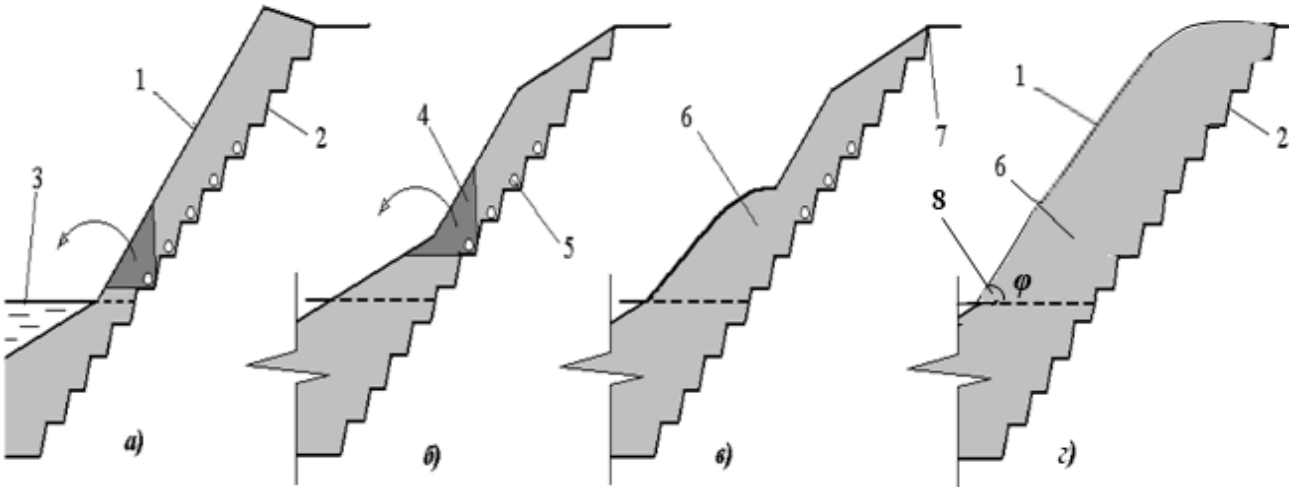


Рис. 5. Послідовність формування прибортового внутрішньокар'єрного насипу спрямованим підриванням лінійних зарядів, розміщених в тюбінгових тунелях: *1* – укіс насипу; *2* – борт кар'єру; *3* – рівень поверхні води; *4* – об'єм породи вибухового викиду; *5* – зарядна порожнина; *6* – порода насипу; *7* – верхній контур кар'єру; *8* – кут природного укосу породи насипу

Подібна система розвитку відвалу дозволить у декілька разів збільшити терміни збереження постійних фронтів розвантаження, а отже і переукладання залізничних шляхів, сприяє зменшенню кутів його укосу та підвищенню безпеки робіт. У подальшому вибухи на викид породи біля основи укосу насипу можна забезпечити формуванням зарядів, розташованих у підривних тунелях, розміщених уже на насипному масиві в безпечних зонах. Цьому значною мірою сприяє той факт, що за підривання на скид порода при падінні значно самоущільнюється і достатнім стає зачистки верхнього її шару бульдозером для підготовки напівтраншеї в укосі насипу з надійною основою для монтажу чергової лінії підривного тунелю. Попередні розрахунки свідчать про те, що в даному випадку технологічні цикли цілком забезпечуються одним нижнім тунелем, так як поступово віддаляються від скельного борту кар'єра, що, враховуючи демпфуючі властивості рихлої породи, дозволяє нарощувати масу камерних зарядів одночасного підривання до достатніх для одноярусного підривання насипу значень, відповідно до граничних обмежень за сейсмічним фактором.

За цих умов варто враховувати й можливу доцільність з останніх міркувань зниження локальної щільності заряджання. А це вирішується дуже просто, завдяки наведеному вище широкому асортименту тюбінгової продукції різних типорозмірів, серед яких майже завжди можна підібрати з необхідною ємністю. До того ж – згідно з рекомендаціями [7] (рис. 6) – тунелі легко компонуються і за рядами, і за ярусами (рис. 4, *2*).

Крім того, порівнюючи ефективність вибухових речовин як джерела енергії з роботою екскаваторно-транспортних комплексів, необхідно враховувати, що при вибухах на викид великих зарядів у гірських породах витрачається лише частка всієї енергії заряду, тобто $\xi = a(1 - e^{-bw})$, де $a \approx 4\%$ та $b \approx (1/40)^{-1}$ – постійні коефіцієнти; w – лінія найменшого опору (ЛНО), м.

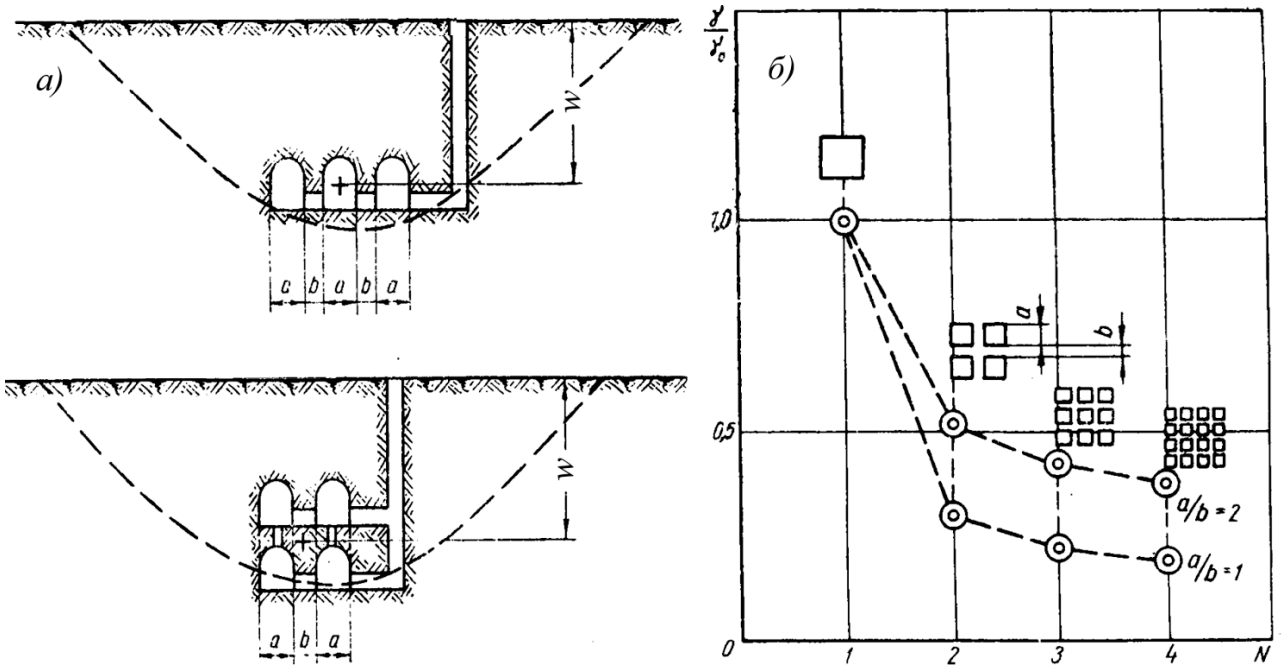


Рис. 6. Схема камер для розосередженого розташування великих зарядів: b/a = 0,5–1 (*а*) та відносна щільність заряджання γ/γ_0, залежно від кількості камер у ряду та кількості поверхів N (*б*)

Графік залежності між коефіцієнтом корисної дії (ККД) вибуху ξ (у %%) та ЛНО w (в метрах), показано на рис. 7.

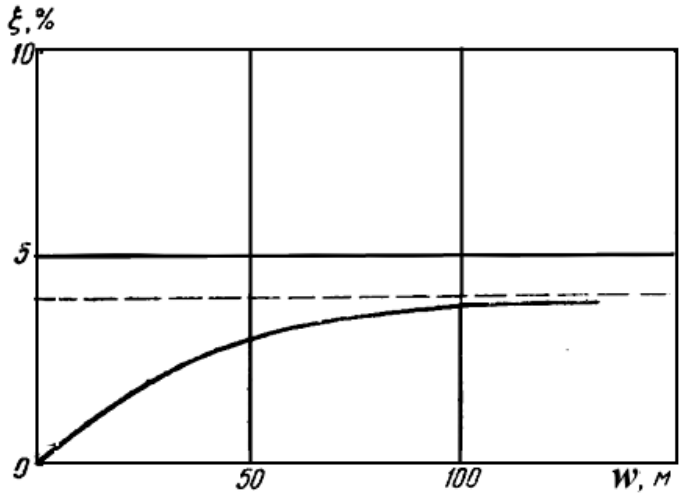


Рис. 7. Графік залежності між ККД вибуху ξ та ЛНО w

З графіка видно, що ξ істотно зростає зі збільшенням w приблизно до 100 м, після яких енергетична ефективності вибухових робіт практично стабілізується, що свідчить про доцільність формування насипів потужністю понад 100 м. Наші ж пропозиції щодо відсипки менш потужного шару безпосередньо на борту стосуються виключно початкового етапу, коли заряди розміщуються на акустично жорсткій скельній основі, і домінуючим стає сейсмічний фактор.

Тому ведення вибухових робіт на викид при ЛНО в межах 30–70 м не може бути основою для оцінки ефективності вибухових робіт великого масштабу. Якщо порівняти енергетичні ККД екскаваторів і врахувати при цьому транспортування породи автосамоскидами або залізницею, то виявиться, що ККД робочого органу екскаватора за аналізованих умов у грубому наближенні дорівнює 10%. Враховуючи ж і те, що енергія, яка живить екскаватор, сама виходить з палива, у якого ККД – близько 25%, виявляється, що загальний енергетичний ККД екскаватора дорівнює 2–3%. Тому масові вибухи на викид з будь-якої точки зору є вигіднішими, ніж переекскавація порід [7].

До того ж, багато залежить і від ВР. Зі збільшенням заряду та відстані його закладання від вільної поверхні час розширення вибухових газів, а також їх максимальної температури – збільшується. Це сприяє більш повному розкладанню ВР та найбільшому виділенню енергії під час вибуху, тому при збільшенні масштабів вибуху можна застосовувати менш якісні, дуже дешеві ВР, навіть – які не здатні повноцінно детонувати у зарядах звичайних розмірів, а тому є цілком безпечними при транспортуванні та зберіганні, що набуває особливого значення, враховуючи тривалість і стисненість умов заряджання протяжних підривних тунелів. Обов’язково враховувати потрібно і те, що, у разі неповного викиду породи, наступними вибухами допущені хиби виправити практично неможливо. Ще важчі наслідки виникають, якщо заряд виявиться надмірно потужним і стануться непередбачувані руйнування або обвалення [7].

Ускладнюється ситуація також і тим, що до певної глибини – кар'єр затоплений водою і в основі укосу роботи вести неможливо без виконання додаткових заходів. У зв'язку з цим підробіток нижньої частини насипу раціональніше здійснювати розмивом гідромонітором, встановленим на понтоні на безпечній відстані від поверхні, що розмивається [13, 14]. Для оцінки стійкості укосів використовують переважно експериментальні дослідження на фізичних моделях або розрахунки зміни напружено-деформованого стану порід з урахуванням інженерних впливів (підрізка, прохідка виробок, будівництво споруд тощо). Середнє значення кутів природних укосів, складених різними породами, показано у табл. 2.

Таблиця 2

Середні кути природних укосів екскаваторних відвалів з різних порід, град.

Типи гірських порід	Мокрі	Вологі	Сухі
Скельні породи	30–32	30–35	32–35
Піщано-глинисті	20–25	30–33	32–37
Глинисті	15–25	30–40	35–40

Аналізуючи стан та рівень сучасного наукового забезпечення спрямованого підривання в гірничих технологіях, зокрема – при формуванні внутрішньокар’єрних насипів різного призначення, можна констатувати наступне.

Загалом теоретична база спрямованого підривання великорозмірних масивів – достатньо розвинена і надійно апробована, але головними об'єктами досліджень при цьому переважно є *ґрунтові масиви*, типові для умов транспортного та гідротехнічного будівництва, в той час, коли реальні *гірські породи*, характерні для гірничодобувних кар'єрів, доволі суттєво відрізняються від них за своїми здебільшого техногенної природи властивостями, які найбільшою мірою проявляються саме при високодинамічному – вибуховому впливі на них, і традиційні розрахункові моделі далеко не завжди забезпечують належну точність деяких важливих розрахунків, що є неприпустимим, враховуючи масштаби сучасних ГЗК та їхніх кар'єрів. Тому розвиток наукових методів обґрунтування параметрів спрямованого підривання для керованого переміщення великих мас прибортових насипів є надзвичайно актуальним і перспективним, а що стосується структури й головних векторів запланованих нами досліджень, то узагальнено вони представлені на рис. 8.



Рис. 8. Загальна структура запланованих досліджень

Висновки. Таким чином, у роботі досліджено передумови застосування енергії масових вибухів у залізорудних кар'єрах для транспортної роботи: переміщення вибухами на викид і скид у вироблений простір дробленої гірничої маси, заскладованої в насипах внутрішніх відвалів або техногенних родовищ на погашених бортах кар'єру. Виконано аналіз близьких за цілями й умовами застосування технологій з визначенням ступеня придатності їх для трансферу в кар'єри гірничозбагачувальних комбінатів.

Вперше обґрунтовано ідею використання для означеної задачі масивних зарядів низькобризантих ВР, розміщених в залізобетонних тунелях, що дає підставу застосовувати аналогію з лінійними зарядами в суцільній оболонці, функцію якої за даних умов виконує армований залізобетонний замкнений контур самого тунелю. Теоретичного значення надає дослідженню саме таке формулювання ідеї разом із системною аргументацією комплексу передумов, необхідних для аналітичного обґрунтування нової технології, так як вони, власне, й зумовлюють розробку принципово нових підходів до побудови розрахункових моделей та вимагають розробки нових засобів реалізації останньої, що реалізується нами, зокрема, конструюванням комбінованих зарядів з розділеними ВР.

Практична значущість представлених в роботі результатів полягає в розробці технологічних схем, конструюванні спеціалізованих засобів і пристроїв, а також – обґрунтуванні складу матеріальної бази (наявних і доступних будівельних конструкцій, виробів, матеріалів).

Загалом, з наведеного вище видно, що матеріальна забезпеченість – цілком задовольняє потреби реалізації розроблених пропозицій, а для теоретичного їх обґрунтування існує достатньо аналітичних моделей і методів, які цілком придатні для використанні їх у якості наукової бази, хоч і вимагають відповідної, подекуди непростої логіко-розрахункової модифікації.

Щодо перспектив подальшого розвитку теоретичних досліджень та їх експериментальної перевірки, то основні їх вектори наведено на рис. 8.

Перелік посилань

1. Луценко, С. О., Жуков, С. О., Григор'єв, Ю. І., & Федоренко, С. О. (2023). Системні невідповідності за традиційного проектування залізорудних кар'єрів. *Гірничий вісник*, (111), 11–18. https://doi.org/10.31721/2306-5435-2023-1-111-11-18
2. Sanchidrián, J. A., Segarra, P., & López, L. M. (2007). Energy components in rock blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *44*(1), 130–147. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.05.002
3. Білецький, В. С. (Ред.). (2004). *Мала гірнича енциклопедія* (Т. 1: А–К). Донбас.
4. Курінний, В. П. (2009). *Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом: Монографія*. Національний гірничий університет.
5. Кравець, В. Г., Коробійчук, В. В., & Бойко, В. В. (2015). *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху: Монографія*. ЖДТУ. http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/689
6. Покровський, Р. І., & Федоров, І. С. (1971). *Зведення гідротехнічних земляних споруд направленим вибухом*.
7. Zhang, Z.-X. (2016). *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2014-0-02521-8
8. Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design* (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b15358
9. Cho, S. H., & Kaneko, K. (2004). Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *41*(5), 771–784. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.02.006
10. Drukovanyi, M. F., Komir, V. M., & Kuznetsov, V. M. (1973). *Deistvie vzryva v gornykh porodakh*. Naukova dumka.
11. ЗБВ «Дніпро». (б. д.). *Ланки прямокутних труб*. https://zbv-dnipro.com.ua/ua/g84534482-zvenya-pryamougolnyh-trub
12. Войтенко, Ю. І., Кравець, В. Г., Шукюров, А., Ган, А. Л., & Коробійчук, В. В. (2018). Ефективність зарядів різних конструкцій при деформуванні та руйнуванні металевих перепон. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, (81), 223–231. https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-223-231

13. Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CSIRO Publishing. https://doi.org/10.1071/9780643101104
14. Fu, Z., Asad, M. W. A., & Topal, E. (2018). A new model for open-pit production and waste-dump scheduling. *Eng. Optim.*, *51*(4), 718–732. https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1476501

ABSTRACT

The purpose of the research is to analyze the effectiveness of the traditional technology of forming internal dumps or technogenic deposits on the inner sides of the depleted sections of the open pits, and to formulate a fundamentally new engineering solution to this problem by using phased blasting of the embankment with mass explosions of directed action on the ejection.

Methodology. In the research process, a comprehensive analysis of the functional significance of the technological components of the formation of intra-pit embankments on the exhausted pit sides was used for the subsequent theoretical substantiation of their parameters. To determine the spatial characteristics of technological components, a graph-analytical method was used with the construction of layout schemes and design solutions depending on variable geogenic and technogenic conditions.

Findings. Based on the shortcomings of traditional technologies of in-pit dump formation in iron ore quarries identified in the review analysis, a new constructive and methodological approach to the formation of artificial embankments for various purposes on their final design sides is proposed. At the same time, the main structural and functional features of the proposed technology and arguments regarding the feasibility of its implementation in deep quarries at the period of their completion are given. The reality of the application of the developed proposals is taken into account and substantiated, and the full material, technical and structural-element availability of everything necessary for this in Ukraine is given.

The originality. For the first time, a set of prerequisites necessary for analytical and graphical substantiation of a new technology for forming a continuous ledge from the upper to the lower contour of the quarry on the eroded sides of embankments has been proposed and systematically argued, taking into account mandatory compliance with work safety standards, seismic consequences, and environmental acceptability. The general structure and algorithm of the planned theoretical studies and their experimental verification are presented.

Practical significance. The proposed technology is promising for implementation in most deep open pits of Kryvbas. Its relevance is due to the fact that after 2040, most of the mining and processing plants of Kryvbas will begin to decommission their quarries. And since this process will occur gradually, the open pits are located relatively close, and the land areas for dumps are practically exhausted, the movement of waste rocks from operating quarries to the spent ones becomes practically the only real solution to the problem and there is currently no other alternative to this.

Keywords: *open pits, quarry wall, ledges, berms, internal dump, blast tunnel, directional blasting, ejection explosion.*

дата першого надходження статті до видання	27.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	28.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. D. Titov
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.