

# ТЕХНОЛОГІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.22-624.1

DOI 10.31649/2311-1429-2025-2-70-76

Панасюк А. В.  
Криворучко А. О.  
Припотень Ю. К.

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТУРНОГО ПІДРИВАННЯ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТУНЕЛІВ ТА ПРОВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК: СУЧАСНІ ПІДХОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Державний університет «Житомирська політехніка»

*В статті розглянуто особливості технології контурного підривання при будівництві тунелів та проведенні виробок при розробці родовищ підземним способом. Розглянуто основні недоліки звичайного підривання та переваги контурного методу. Представлено математичну модель для розрахунку оптимальної відстані між свердловинами зарядів з урахуванням властивостей вибухових речовин та характеристик порід, в яких проводяться виробки. Проаналізовано сучасні методи контурного підривання, включаючи попереднє щілиноутворення та контурне відбивання. Визначено основні технологічні параметри та рекомендації щодо практичного застосування методів контурного підривання в різних геологічних умовах.*

**Ключові слова:** контурне підривання, тунелі, будівництво, підземні гірничі виробки, буро-вибухові роботи, бурова установка, оптимізація параметрів вибуху.

### Вступ

Підземне будівництво та гірнича галузь потребують застосування високоточних та економічно ефективних методів проведення виробок різного призначення. Традиційні методи вибухових робіт, незважаючи на їх широке розповсюдження, характеризуються цілим рядом недоліків, які суттєво впливають на якість, стійкість та економічні показники будівництва підземних споруд.

Актуальність дослідження обумовлюється підвищеними вимогами до точності проведення підземних виробок, необхідністю зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та підвищенням безпеки робіт. Особливо на це слід звертати увагу при будівництві тунелів у міських умовах, де мінімізація впливу на існуючі споруди є надзвичайно важливою з різних точок зору.

Метою роботи є аналіз та систематизація сучасних підходів до контурного підривання, розробка рекомендацій щодо оптимізації технологічних параметрів та визначення її перспектив при будівництві тунелів та підземних гірничих виробок.

### Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Дослідження в галузі контурного підривання почали проводитися з середини минулого століття. Значний внесок у розвиток цієї технології зробили вчені різних країн, зокрема США, Канади, Швеції, Японії та інших розвинених країн з потужною гірничою промисловістю.

Аналіз світового досвіду показує, що застосування контурного підривання дозволяє зменшити перебори породи на 60-80%, підвищити стійкість оголень на 40-60% та знизити в подальшому витрати на кріплення на 25-35%. Однак, слід зазначити, що більшість існуючих методів часто не враховують специфіку геологічних умов та потребують адаптації до певних умов застосування.

Основною проблемою тут слід визнати відсутність комплексного підходу до вибору технологічних параметрів контурного підривання з урахуванням взаємодії всіх факторів, що впливають на результат при проведенні виробок, що призводить до зниження її ефективності.

### Методика досліджень

Дослідження базувалися на комплексному підході, який включав: аналіз теоретичних основ контурного підривання, експериментальні дослідження на модельних стендах, випробування в різних геологічних умовах, математичне моделювання процесів руйнування, статистичну обробку результатів

Для оцінки ефективності контурного підривання використовувалися критерії якості контуру, економічні показники та параметри безпеки.

### Основна частина

Звичайне підривання, незважаючи на простоту його проведення, характеризується рядом суттєвих недоліків, які мають комплексний негативний вплив на процес будівництва підземних споруд.

Фактичні контури виробок при звичайному підриванні, як правило, суттєво відрізняються від проектних. Середні відхилення можуть сягати 15-25% від проектних розмірів, що призводить до значних переборів породи. За статистичними даними, перебори породи при звичайному підриванні складають 20-35% від проектного об'єму проведення виробки. Це безпосередньо впливає на збільшення об'ємів навантажувальних та транспортних робіт, тим самим підвищуючи собівартість будівництва на 12-18%.

Додатковими економічними наслідками є підвищені витрати кріпильного матеріалу, які можуть збільшуватися на 25-40% порівняно з проектними показниками. Особливо це критично при будівництві тунелів великого перерізу, де навіть невеликі відхилення призводять до значних додаткових витрат.

Ще одним з серйозних недоліків звичайного підривання є інтенсивне утворення тріщин у законтурному просторі. Зона порушень може поширюватися на відстань до 3-5 поперечних перерізів виробки, що суттєво зменшує природну міцність та стійкість порід, в яких проводиться виробка.

В зв'язку з цим виникає цілий ряд негативних наслідків. По-перше, зменшення міцності породного масиву викликає частіші деформації кріплення та необхідність у перекріпленні виробок. При цьому витрати на ремонт кріплення при використанні звичайного підривання в 2-3 рази вищі порівняно з контурним методом.

По-друге, утворені тріщини можуть ставати місцем накопичення шкідливих газів, які утворюються під час вибухових робіт. Ці гази, проникаючи через тріщини на значну глибину, поступово виділяються в атмосферу робочого простору протягом тривалого періоду, що створює додаткові ризики для здоров'я працівників та потребує збільшення терміну провітрювання виробок або збільшення кількості подаваного свіжого повітря до неї, за умови такої можливості з урахуванням обмеження швидкості руху повітря по виробках.

При будівництві в міських умовах звичайне підривання може призводити до негативних впливів на існуючі будівлі та споруди, насамперед, вібраційної дії. Рівень вібрацій може перевищувати допустимі норми в радіусі до 100-150 м від місця проведення робіт, що спричиняє обмеження областей застосування цього методу в густонаселених районах.

Контурне підривання, в свою чергу, являє собою науково-обґрунтований технологічний метод проведення буро-вибухових робіт, спрямований на досягнення високої точності контурів виробок при мінімальному впливі на вмшуючий породний масив. Основний принцип контурного підривання полягає у створенні контрольованої зони руйнування за рахунок точного дозування енергії вибуху та оптимального розміщення зарядів.

Механізм дії контурного підривання базується на використанні ефекту концентрації напружень між сусідніми свердловинами при одночасному або послідовному підриванні зарядів зменшеної потужності. При оптимальних параметрах відстані між свердловинами та величині заряду створюються умови для утворення контрольованої тріщини між свердловинами без значного порушення за масиву.

Ключовим фактором є співвідношення між енергією, що виділяється при вибуху, та енергією, яка є необхідною для руйнування породи по заданому контуру. Математично це може бути описано через коефіцієнт використання енергії вибуху:

$$\eta = \frac{E_{\text{корисна}}}{E_{\text{загальна}}}$$

де  $E_{\text{корисна}}$  – енергія, що витрачається на утворення контрольованої тріщини,

$E_{\text{загальна}}$  – загальна енергія вибуху.

Для ефективного контурного підривання цей коефіцієнт повинен знаходитися в межах 0,6-0,8, тоді як при звичайному підриванні він зазвичай не перевищує 0,3-0,4.

Сучасна практика розрізняє кілька основних методів контурного підривання, кожен з яких має свої особливості та область застосування.

*Метод попереднього щілиноутворення (Presplitting).* Цей метод передбачає підривання контурного ряду свердловин перед основним масовим вибухом. Основною перевагою цього способу є створення захисного екрану у вигляді попередньо утвореної тріщини, яка обмежує поширення ударної хвилі від основного вибуху. Метод особливо ефективний при проведенні виробок у твердих стійких породах з незначною тріщинуватістю. Головним геометричним параметром є відстань між свердловинами, яка зазвичай коливається в межах 8-15 діаметрів свердловини. Лінійна концентрація заряду становить близько 100-300 г/м в залежності від міцності породи.

Найпоширеніші області застосування це будівництво автомобільних тунелів у твердих скельних породах, створення виїмок для гідротехнічних споруд, розробку кар'єрів в граніті та гнейсі, а також проходку шахтних стволів у стійких породах.

*Метод контурного відбивання (Smooth blasting).* Суть цього методі полягає в тому, що контурний ряд підривається одночасно з останнім рядом основних зарядів або з невеликою затримкою (25-50 мс). Це дозволяє використовувати ефект відбивання від вільної поверхні, яка створюється енергією основного вибуху. Відстань між свердловинами при цьому методі зазвичай менша (6-10 діаметрів свердловини), а лінійна концентрація заряду становить 150-400 г/м. Метод більш універсальний та може застосовуватися в породах різної міцності.

Основними сферами його застосування є будівництво міських транспортних тунелів метрополітену, проходка гірничих виробок на вугільних шахтах, створення підземних сховищ та паркінгів в умовах міської забудови, а також будівництво колекторів та інженерних комунікацій. Метод широко використовується при цьому, показуючи стабільні результати в різноманітних геологічних умовах.

*Метод механічного оконтурювання.* Це метод передбачає використання щільно розміщених пробурених порожніх свердловин для створення захисного екрану. Відстань між свердловинами зменшується до 3-5 діаметрів, але при цьому свердловини залишаються незарядженими. Цей метод особливо перспективний для роботи в міських умовах, де необхідно мінімізувати вібраційний вплив.

Основне застосування знаходить при реконструкції історичних центрів міст, будівництві під існуючими будівлями та спорудами, створенні підземних переходів у густонаселених районах, а також при роботі поблизу особливо важливих та громадських об'єктів (лікарні, школи, пам'ятки архітектури).

Визначення оптимальних параметрів контурного підривання потребує комплексного математичного підходу, що враховує властивості як вибухової речовини, так і гірських порід, в яких проводиться виробка.

Як зазначалося вище, одним з основних параметрів, який визначає ефективність контурного підривання, є відстань між свердловинами контурного ряду. Ця відстань повинна забезпечувати надійне з'єднання зон руйнування навколо кожної свердловини при мінімальному впливі на законтурний масив.

Для врахування всіх особливостей була запропонована формула, яка б враховувала основні фактори, що впливають на процес:

$$a = k \cdot d \cdot \left(1 + 2^{\frac{1}{n}}\right) \cdot \left\{ \frac{2 \cdot \nu \cdot P_d \cdot \left(\frac{V_3}{V_c}\right)^X}{(\sigma_p \cdot (1 + \nu) \cdot (1 + c))} \right\}^{\frac{1}{m}}$$

Де,  $k=0,95-1,2$  – коефіцієнт, який враховує орієнтацію природної тріщинуватості масиву відносно площини оконтурювання. Для ізотропних порід  $k = 1,0$ , для порід з вираженою шаруватістю або тріщинуватістю цей коефіцієнт коригується залежно від орієнтації системи тріщин.

$d$  – діаметр свердловини, мм,

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона,

$P_d$  – детонаційний тиск на заряд вибухової речовини, Па,

$V_3$  – об'єм заряду вибухової речовини в свердловині, м<sup>3</sup>,

$V_p$  – об'єм самої свердловини, м<sup>3</sup>,

$X$  – показник адиабати, його значення знаходяться в межах 1,17-1,25 для більшості промислових ВР.

Для емульсійних ВР  $X \approx 1,20$ , для амоніту  $X \approx 1,23$ ,

$\sigma_p$  – межа міцності на стиск, Па,

$$m - \text{ступінь затухання ударної хвилі в зоні руйнування: } m = \frac{2 + \nu}{1 - \nu}$$

$$n - \text{ступінь затухання в зоні утворення тріщин: } n = \frac{2 - \nu}{1 - \nu}$$

Всі ці параметри мають фізично обґрунтоване значення та можуть бути визначені експериментально або розрахунково.

Важливим аспектом є вибір оптимальної конструкції заряду в свердловинах при контурному підриванні. Для забезпечення рівномірного розподілу енергії по всій довжині свердловини рекомендується використовувати подовжені заряди з лінійною концентрацією вибухової речовини 150-400 г/м в залежності від міцності породи.

Співвідношення  $V_z/V_c$  (ступінь заповнення свердловини вибуховою речовиною) для контурного

підривання зазвичай становить 0,3-0,6, що значно менше ніж при звичайному підриванні (0,7-0,9). Це забезпечує більш м'який режим вибуху з мінімальним впливом на законтурний масив.

Для оптимального проведення вибухових робіт методами контурного підривання слід також враховувати ряд технічних особливостей даної технології.

Вдале контурне підривання досить сильно залежить від точності виконання бурових робіт. Відхилення свердловин від проектного положення не повинні перевищувати  $\pm 2\%$  кута нахилу свердловини від його проектного напрямку по довжині та  $\pm 50$  мм для положення устя свердловини.

Для забезпечення такої точності необхідно використовувати сучасне бурове обладнання з системами автоматичного наведення та контролю параметрів буріння. Рекомендується застосування обладнання з комп'ютерним управлінням, що автоматично відтворює проектне розташування свердловин.

Також для контурного підривання рекомендується використовувати ВР з пониженою бризантністю та контрольованою швидкістю детонації. Оптимальними в цьому випадку будуть емульсійні ВР зі швидкістю детонації 4500-5500 м/с, що забезпечує достатню енергію для руйнування при м'якому режимі навантаження.

Діаметр патронів ВР для контурних свердловин повинен складати 50-70% від діаметра свердловини, тим самим, забезпечуючи необхідну повітряну подушку для зниження тиску детонації.

Точність часу спрацювання детонаторів критично важлива для контурного підривання. Рекомендується використання електронних детонаторів з точністю  $\pm 1$  мс, що дозволяє реалізувати оптимальну послідовність підривання.

Для методу попереднього щілиноутворення контурний ряд підривається з випередженням 100-200 мс відносно основних зарядів. Для методу контурного відбивання – одночасно з останнім рядом або з затримкою 25-50 мс.

### Результати досліджень та їх обговорення

Проведені промислові випробування в різних геологічних умовах показали високу ефективність контурного підривання.

У твердих породах з межею міцності на стиск понад 80 МПа застосування методу дозволило зменшити перебори породи на 65-75% порівняно зі звичайним підриванням. Найкращі результати отримано при роботі в гранітах, де відхилення від проектного контуру не перевищували 3-5%. У породах середньої міцності ефект був дещо меншим, при цьому зменшення переборів відбувалося на 50-60%, що пов'язано з більшою деформованістю таких порід та складністю контролю процесу руйнування.

Застосування контурного підривання в міських умовах дозволить знизити рівень сейсмічного впливу на 40-60% порівняно з традиційними методами проведення. Це дозволило проводити роботи на незначних відстанях (50-70 м) від житлових будинків без порушення їх конструктивної цілісності.

Економічна ефективність контурного підривання проявляється в комплексному зниженні витрат на всіх етапах будівництва. Зменшення витрат на навантажувально-транспортні роботи складає 15-25% завдяки точності контурів та відсутності значних переборів породи. Економія кріпильного матеріалу досягає 20-35% через кращий стан законтурного масиву та зменшення деформацій кріплення. Скорочення на 10-15% термінів будівництва досягається завдяки зменшенню обсягів додаткових робіт з усунення переборів та ремонту кріплення.

Екологічні показники демонструють суттєве покращення умов праці та зниження негативного впливу на довкілля. Обсяг пилоутворення зменшується на 30-45% завдяки більш контрольованому характеру руйнування, що особливо важливо при роботі в обмеженому просторі підземних виробок. Концентрація шкідливих газів у повітрі робочої зони знижується на 25-35% через зменшення зони тріщинуватості, де можуть накопичуватися шкідливі гази.

Динаміка покращення основних показників буро-вибухових робіт при застосуванні контурного підривання показує гарну ефективність методу в різних умовах. Найбільший ефект спостерігається у твердих породах, де точність оконтурювання досягає максимальних показників. Економічні показники демонструють окупність додаткових витрат на точне буріння та спеціальні вибухові речовини вже на стадії проходки завдяки зниженню супутніх витрат.

Аналіз залежності ефективності контурного підривання від міцності породи показує, що оптимальна область застосування контурного підривання знаходиться в діапазоні міцності 60-140 МПа, де досягається найкраще співвідношення технічної ефективності та економічних витрат (рис. 1.). Однак, слід зазначити незначний спад зменшення після 110 МПа.

Порівняльна таблиця ефективності методів підривання

Показник	Звичайне підривання	Контурне підривання	Покращення, %
Перебори породи, % від проектного об'єму	20-35	5-10	65-75
Відхилення від проектного контуру, см	15-25	3-8	70-80
Глибина зони порушень, м	3-5	0,5-1,5	75-85
Витрати на навантажувальні роботи	100	75-85	15-25
Витрати на закріпний матеріал	100	65-80	20-35
Рівень сейсмічного впливу, мм/с	8-12	3-7	40-60
Концентрація пилу, мг/м <sup>3</sup>	15-25	8-17	30-45
Терміни будівництва	100	85-90	10-15
Загальна собівартість	100	88-92	8-12

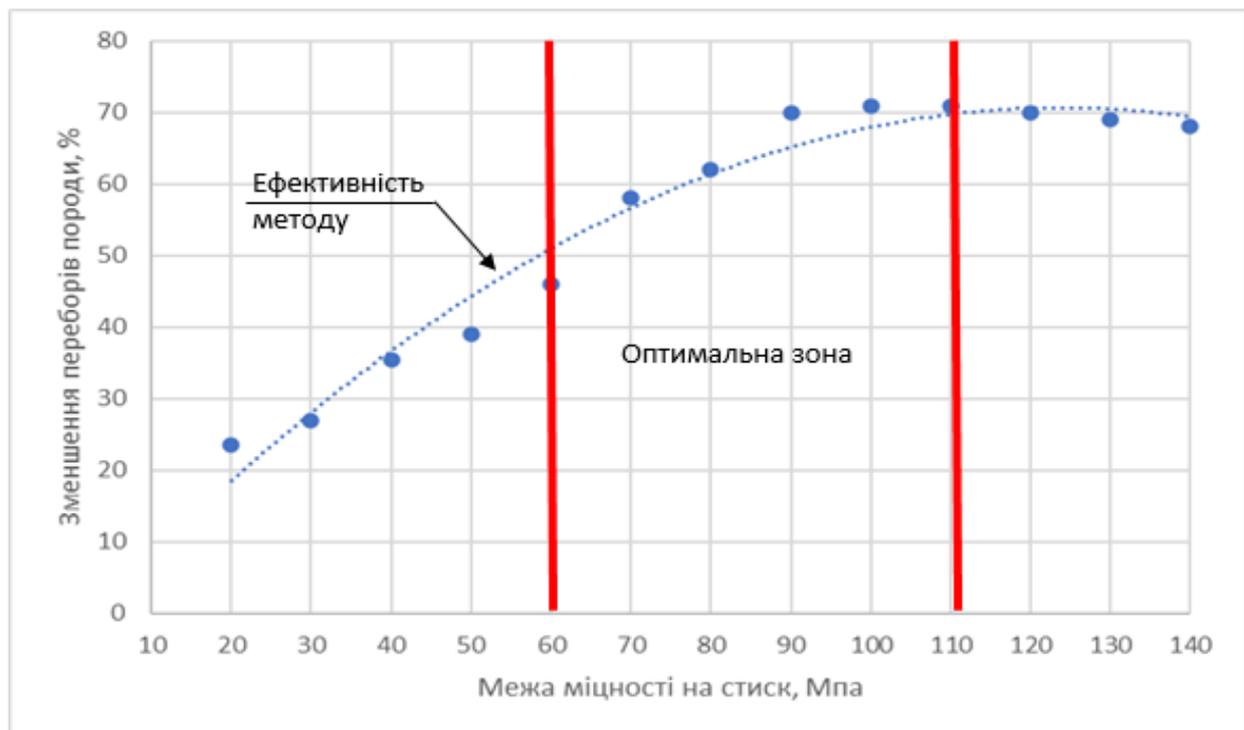


Рисунок 1 – Залежність ефективності контурного підривання від міцності породи

Перераховані переваги контурного підривання при проведенні виробок, не є кінцевими, а отже існують шляхи для покращення даної технології. Автоматизація процесів один з найперспективніших напрямків розвитку контурного підривання. Використання систем комп'ютерного моделювання дозволяє створювати тривимірні моделі масиву та оптимізувати параметри підривання для конкретних геологічних умов. Програмні комплекси дозволяють моделювати процеси поширення ударних хвиль та прогнозувати зони руйнування з високою точністю. Впровадження систем автоматичного контролю параметрів буріння та заряджання мінімізує людський фактор та підвищує ефективність роботи.

Розвиток нових видів вибухових речовин також може відкривати додаткові можливості для підвищення ефективності контурного підривання. Особливу увагу слід приділити емульсійним ВР з керованою швидкістю детонації, що дозволяє адаптувати режим вибуху до конкретних гірничо-геологічних умов.

Поєднання контурного підривання з механічними методами руйнування, також дасть можливість підвищити точність оконтурювання виробок. Використання гідравлічних молотів для довершення контуру після основного вибуху дозволяє досягти відхилень менше 2-3 см від проектного положення. Комбінування з алмазним різанням особливо ефективно при роботі з декоративним каменем, де необхідно забезпечити ідеальну якість поверхні, що є важливим елементом містобудівництва.

Диджиталізація процесів контролю та управління досягається шляхом використання систем дистанційного моніторингу параметрів вибуху, використання дистанційних технологій для оцінки якості контуру.

### Висновки

- Контурне підривання являє собою ефективну альтернативу звичайному підриванню при будівництві тунелів та проведенні гірничих виробок, що дозволяє суттєво підвищити точність контурів та зменшити негативний вплив на оточуючий масив. При контурному підриванні виникає можливість зменшення переборів породи на 65-75% у твердих породах та на 50- 60% у породах середньої міцності, тим самим значно покращуючи техніко-економічні показники будівництва.
- Контурне підривання може бути рекомендовано при проведенні всіх типів гірничих виробок, будівництві тунелів та підземному міському будівництві, не звертаючи уваги на орієнтацію виробок в просторі. Воно дозволяє зменшити обсяг переборів породи за проектним контуром, підвищити стійкість укосів уступів, виїмок і гірничих виробок, знизити витрати на їх підтримку і ремонт у процесі експлуатації, зменшити витрату матеріалів при зведенні кріплення.
- Запропонована модель для розрахунку відстані між свердловинами враховує основні фактори, що впливають на процес контурного підривання, включаючи властивості вибухової речовини, характеристики породи та геометричні параметри свердловин. Модель може бути використана для оптимізації параметрів в різних геологічних умовах з урахуванням специфічних особливостей конкретних об'єктів будівництва.
- Економічна ефективність контурного підривання обумовлена комплексним впливом на всі етапи будівництва. Зменшення переборів породи, економія закріпних матеріалів, скорочення термінів будівництва та зниження витрат на ремонт кріплення в сукупності забезпечують зниження собівартості робіт на 8-12%. Додаткові економічні переваги включають можливість використання більш економічного набризк-бетонного кріплення замість традиційних методів підтримки виробок.
- Екологічні переваги методу особливо важливі при роботі в міських умовах та поблизу об'єктів, чутливих до вібраційного впливу. Зниження рівня сейсмічного впливу на 40-60%, зменшення пилоутворення та концентрації шкідливих газів створюють значно кращі умови праці та знижують негативний вплив на навколишнє середовище та населення.
- Перспективи розвитку технології пов'язані з комплексною цифровізацією процесів, включаючи автоматизацію проектування та контролю, розробку нових видів вибухових речовин з керованими характеристиками та впровадження комбінованих технологій технологій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zhou, Z., Shi, X., Yang, J., & Luo, Q. (2019). *Comparison of presplit and smooth blasting methods for excavation of rock wells. Advances in Civil Engineering, 2019, Article 3743028.* <https://doi.org/10.1155/2019/3743028>
- [2] Li, S., Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X. (2023). *Study of presplit blasting under high in-situ stress. Engineering Fracture Mechanics, 287, 109360.* <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109360>
- [3] Zhang, C., Liu, W., & Zhao, H. (2021). *Presplit blasting technique in treating hard overlying strata: From numerical simulation to field practice. Advances in Civil Engineering, 2021, Article 5558538.* <https://doi.org/10.1155/2021/5558538>
- [4] Yang, J., Wu, X., Fu, Q., Hou, S., Song, H., Jin, H., Liu, Y., & Tang, J. (2024). *Experimental study on an innovative method for pre-split blasting to protect withdrawal roadways. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57, PP. 6163–6181.* <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03844-3>
- [5] Hu, Y. G., Lu, W. B., Chen, M., Yan, P., & Yang, J. H. (2014). *Comparison of blast-induced damage between presplit and smooth blasting of high rock slope. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, PP. 1307–1320.* <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0475-7>
- [6] Hong, Z. X., Tao, M., Zhao, R., Zhou, J., & Zhao, M. S. (2023). *Investigation on overbreak and underbreak of pre-stressed tunnels under the impact of decoupled charge blasting. International Journal of Impact Engineering, 182, 104784.* <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104784>
- [7] Shi, J., Wang, Y., Yang, Z., Shan, W., & An, H. (2024). *Comprehensive review of tunnel blasting evaluation techniques and innovative half porosity assessment using 3D image reconstruction. Applied Sciences, 14 (21), 9791.* <https://doi.org/10.3390/app14219791>

- [8] Han, H., Fukuda D., Liu H., Salmi E.F., Sellers E., Liu T., Chan A. (2020). *Combined finite-discrete element modelling of rock fracture and fragmentation induced by contour blasting during tunnelling with high horizontal in-situ stress*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 127, Article 104214. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104214>
- [9] Zare, M., & Bruland, A. (200). *Comparison of tunnel blast design models*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, PP. 533–542. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.09.001>
- [10] Pytel, W., Mertuszka, P., Fulawka, K., Szumny, M., & Stolecki, L. (2019). *Numerical modeling of rockmass behaviour due to blasting operations in underground mines*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.04815>

**Panasiuk A.V**  
**Kryvoruchko A.O**  
**Prypoten Y.K**

## IMPROVEMENT OF CONTOUR BLASTING TECHNOLOGY IN TUNNEL CONSTRUCTION AND MINING EXCAVATION: MODERN APPROACHES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Zhytomyr Polytechnic State University

*The article examines the comprehensive features of contour blasting technology in tunnel construction and excavation works during underground mining development operations. The main disadvantages of conventional blasting methods are analyzed in detail, including excessive disruption of rock mass integrity, formation of extensive fractured zones around excavations, significantly increased support costs, reduced structural stability, and compromised work safety conditions. The substantial advantages of contour methods are highlighted, including effectively minimizing rock contour damage, dramatically improved excavation surface quality, reduced overbreak volumes, substantial savings in support materials, enhanced excavation precision, and improved overall project economics. A comprehensive mathematical model is presented for calculating optimal spacing between blast holes, considering explosive properties, dynamic characteristics of rocks being excavated, geomechanical parameters of the rock mass, stress distribution patterns, and local geological conditions. Modern contour blasting methods are thoroughly analyzed, including pre-splitting techniques, smooth blasting procedures, controlled blasting approaches, and their various combined variants tailored to specific geological formations. Key technological parameters are systematically determined: optimal borehole diameter, precise charge spacing calculations, appropriate linear charge mass distribution, suitable explosive type selection, advanced initiation system design, timing sequence optimization, and burden-to-spacing ratios. Detailed practical recommendations are provided for applying contour blasting methods under various challenging geological conditions, including hard crystalline rock formations, medium-strength sedimentary rocks, fractured rock masses, and weak soil conditions. Quality control issues and comprehensive effectiveness evaluation of contour blasting methods in complex underground conditions are thoroughly considered. The research addresses systematic optimization of blasting parameters through extensive field testing, continuous monitoring of excavation quality indicators, vibration control measures, and post-blast damage assessment protocols. Special attention is given to advanced safety measures, environmental impact considerations, noise control, and dust management when implementing sophisticated contour blasting technologies in underground mining operations and modern tunnel construction projects.*

**Панасюк Андрій Вікторович** — к.т.н., доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>, [kgt\\_pav@ztu.edu.ua](mailto:kgt_pav@ztu.edu.ua)

**Криворучко Андрій Олексійович** — к.т.н., доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>, [km\\_kao@ztu.edu.ua](mailto:km_kao@ztu.edu.ua)

**Прийотень Юлія Костянтинівна** — к.т.н., доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка», <https://orcid.org/0000-0003-2671-8240>, [krrkp\\_pyuk@ztu.edu.ua](mailto:krrkp_pyuk@ztu.edu.ua)

**Panasiuk Andrii Viktorovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mine Surveying, Zhytomyr Polytechnic State University, <https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>, [kgt\\_pav@ztu.edu.ua](mailto:kgt_pav@ztu.edu.ua)

**Kryvoruchko Andrii Oleksiiovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mine Surveying, Zhytomyr Polytechnic State University, <https://orcid.org/0000-0003-3332-2631>, [km\\_kao@ztu.edu.ua](mailto:km_kao@ztu.edu.ua)

**Prypoten Yuliia Kostiantynivna** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Technologies and Construction named after Prof. Bakka M.T., Zhytomyr Polytechnic State University, <https://orcid.org/0000-0003-2671-8240>, [krrkp\\_pyuk@ztu.edu.ua](mailto:krrkp_pyuk@ztu.edu.ua)