

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-11>

УДК 622.235.67

ВОРОБІЙОВ ВІКТОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-3446-4714>e-mail: vvv.imit@gmail.com**ВОРОБІОВА ЛАРИСА**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0001-5333-6091>e-mail: larivorobiova@gmail.com**ПАСТУШЕНКО РУСЛАН**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0003-1087-1558>e-mail: r.m.pastushenko@gmail.com**СОЛОВЕЙ АНДРІЙ**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-4593-702X>e-mail: andre37gy8@gmail.com

ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ ЗАРЯДІВ НА ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ НАВАЛУ

У статті розглядається вплив форми заряду вибухової речовини (ВР) і його просторового розміщення в масиві схилу на зміну основних параметрів розвалу викинутої породи. Обробка результатів лабораторних експериментів на модельному матеріалі відобразила істотний вплив форми заряду на кінцеві результати вибуху. Виконані експерименти довели, що використання криволінійних зарядів дозволяє керувати профілем навалу, де порівняно з результатами вибуху на викид зосередженого заряду на 25% зростає маса ґрунту, покладеного в центральну частину, її довжина збільшується майже в 5 разів, ширина зменшується в 2...3 рази, а висота навалу зростає в 3... 6 разів. Результати роботи можуть бути використані при плануванні буровибухових робіт для стабілізації схилів, а також при вибухах на скидання.

Ключові слова: вибух, вибухова речовина, викид, заряд, зосереджений, криволінійний, навал, профіль, схил.

VOROBYOV VIKTOR, VOROBIOVA LARISA, PASTUSHENKO RUSLAN, SOLOVEY ANDRIY

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

INFLUENCE OF SPATIAL DISTRIBUTION OF CHARGES ON THE FORMATION OF THE BULK PROFILE

Purpose. The drilling and blasting method is widely used in modern technologies such as mining, slope development for hydroelectric facilities, slope profile stabilization during highway and railway construction, preparation of foundations for the construction of nuclear power plants, tunnels, etc. Based on this, the study of the influence of the explosive charge (EC) shape and its spatial arrangement in the slope massif on the change in the main parameters of the collapse of the ejected rock mass (mass, length, longitudinal and cross-section) is an urgent problem.

Methods. The work uses a comprehensive methodological approach, including analysis of literary sources, laboratory experiments on model materials, recording the spread of soil and geometric parameters of the collapse during an explosion on a slope using high-speed filming.

Results. Processing of the experimental results showed a significant influence of the charge shape and its spatial arrangement on the final results of the explosion. The experiments conducted revealed that the use of curvilinear charges allows controlling the profile of the pile: compared to the results of the explosion on the ejection of a concentrated charge, the mass of soil placed in the central part increases by 25%, its length increases almost 5 times, the width decreases by 2...3 times, and the height of the pile increases by 3...6 times.

Novelty. The work is the first to study the influence of ring charges on the efficiency of a blast on a slope. It has been experimentally established that the optimal charge is a curvilinear charge with a central angle equal to 240°.

Practical conclusions. The results of the work can be used in planning drilling and blasting operations to stabilize slopes, as well as in blasting for dumping.

Key words: blast, explosive, emission, charge, curvilinear, pile, profile, slope, concentrated.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Метод буровибухових робіт знаходить широке застосування в сучасних технологіях, таких як гірничодобувна промисловість, розробка схилів для гідроенергетичних об'єктів, стабілізація профілів схилів при проходженні автомобільних і залізничних трас, підготовка основ для будівництва атомних електростанцій. Його кінцевий результат (особливо розвал відбитої гірничої породи) суттєво впливає на наступні технологічні операції, а також на собівартість і безпеку гірничих робіт. Процес утворення розвалу відбитої гірської маси вибухом безпосередньо пов'язаний з процесами дроблення і відбійки гірської породи. Цей напрямок досліджувався великою кількістю науковців і виробників, проте проаналізувавши результати наукових праць різних авторів можна стверджувати, що до теперішнього часу відсутнє єдине загальновизнане уявлення про фізичний процес формування розвалу гірничої маси при вибуху. Спроби теоретичного розв'язання цього завдання разом із складною проблемою дроблення

гірських порід вибухом не призвели до розробки придатних практичних розрахункових методів прогнозування параметрів розвалу [1 - 3]. Крім того, при дослідженні вибухових робіт у відкритих кар'єрах чи інших проєктах, можна стверджувати, що не вся енергія вибуху повністю використовується для дроблення гірських порід у межах проєктної області виїмки. Надмірне споживання енергії, яке впливає на вібрацію ґрунту, шуми і тому подібне, неминуче. Також вибухові роботи викликають пошкодження та руйнування навколишніх скельних масивів, що надалі призводить до проблем безпеки та стійкості [4, 5]. Таким чином, вивчення та прогнозування впливу просторового розташування зарядів вибухових речовин на кінцевий результат вибуху на схилі є актуальним, але все ще маловивченим питанням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У даний час неможливо уявити гірничу промисловість без застосування буровибухових робіт. Ключовим результатом виробництва буровибухових робіт (БВР) є формування розвалу відбитої гірничої маси з дробленням необхідної якості. Залежно від гірничо-геологічних умов видобутку та технології гірничих робіт до розвалу висуваються певні вимоги за геометричними параметрами, такими як висота, ширина та довжина (особливо це стосується гідротехнічного будівництва та стабілізації схилів). Геометричні параметри розвалу істотно впливають на наступні технологічні операції та безпеку гірничих робіт [6-8]. При великій довжині і ширині розвалу відбита гірська маса лягає порівняно тонким шаром на значній ділянці уступу. На широких розвалах знижується продуктивність екскаваторів та автосамоскидів при навантаженні гірничої маси, тому що потрібно відволікання техніки на зачистку робочого майданчика. У таких виробничих умовах виникають обмеження щодо розміщення обладнання та погіршуються техніко-економічні показники роботи підприємства. При відбійці блоків над транспортною бермою, обсяг скинутої гірської маси може частково, а іноді і повністю, перекривати їх. У зв'язку з цим збільшується час простою гірничо-транспортного обладнання, пов'язаний із розчищенням проїздів. Також потрібне залучення додаткової техніки для розчищення скидання. Крім того, засипання берм, у деяких випадках, може погіршити рівень безпеки гірських робіт на нижніх горизонтах кар'єру. Враховуючи все це, зрозуміло, чому питання зменшення ширини розвалу та мінімізація обсягів скидання на транспортну та вловлюючу берми кар'єра є актуальними для вивчення. Розуміння причин походження скидання, експериментальне визначення та виявлення основних факторів, що впливають на ширину розвалу та обсяги скидання гірничої маси, надасть можливість ефективно управляти параметрами БВР та дозволить зменшити час простою гірничо-транспортного обладнання, підвищить продуктивність виїмкової техніки й покращить безпеку гірничих робіт.

Проведені дослідження виявили, що спрямований вибух досить активно використовується для будівництва ґрунтових гребель у різних країнах. Так при зведенні ґрунтових споруд спрямованим вибухом в Узбекистані за техніко-економічними показниками і технологією будівництва найбільшого поширення набули ґрунтові греблі: 29 - земляні однорідні; 17 – земляні (кам'яно-земляні) із ядром; 6 – земляні із екраном [9]. Але найбільше ґрунтові греблі будуються у високо сейсмічних районах Японії, Китаю та США. Вони зводяться з доступних та дешевих місцевих матеріалів та практично на будь-яких основах. Наприклад, у Японії за останні 70 років було побудовано 1852 греблі, із них 1227 – з ґрунтових матеріалів, у тому числі 43 – кам'яно-накидних. У США щорічно будується 125 гребель і майже всі із ґрунтових матеріалів. В даний час у Киргизії на річці Нарин спроектовано каскад вибухонакидних гребель, які мають висоту від 270 до 60 м. У зв'язку з цим можна стверджувати, що спрямований вибух є одним із основних методів будівництва гребель у гірських районах. Будівництво ґрунтових гребель спрямованим вибухом є унікальною проблемою, що поєднує цілий комплекс складних питань [10, 11]. При будівництві ґрунтових гребель за допомогою енергії вибуху необхідно виділити три відмінні процеси: розпушування ґрунту, його переміщення в русло річки і його ущільнення. При транспортуванні гірничої маси за допомогою вибуху здійснюється кидок породи в заданому напрямку, для якого необхідно шар ВР розміщувати вздовж всієї поверхні ґрунту, що вибухає, але в реальних умовах заряди розміщуються в одній або інколи в декількох точках [12]. Останнім часом енергія вибуху також знаходить широке застосування при стабілізації схилів для створення безпечних умов експлуатації залізничних та автомобільних магістралей і є єдиним можливим методом досягнення успіху [13 - 15].

Аналіз перелічених робіт свідчить, що при дослідженні дії вибуху на схилах найчастіше основна увага приділяється впливу сейсмічних навантажень на підвищення тріщинуватості масиву та її подальшу стійкість. Традиційно використовують шпурові або свердловинні заряди, розташовані паралельно підставі або поверхні схилу. При цьому питання управління параметрами розвалу викинутої породи розглянуті недостатньо. Тому дана проблема стала основою вибору завдань для проведення наступних досліджень.

Формулювання цілей статті

Мета роботи – у лабораторних умовах дослідити вплив форми заряду вибухової речовини (ВВ) та її просторового розташування у масиві схилу на основні параметри розвалу викинутої гірничої маси.

Виклад матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження були проведені на лабораторній установці, яка дозволяє моделювати різні кути нахилу схилу (рис. 1). Як гірську породу використовували пісок (вологість 6 – 8 %; пористість 0,25 – 0,3; щільність 1700 – 1800 кг/м³). Як ВР були використані заряди піротехнічного складу з добавкою магнію (5%). Швидкість детонації даних зарядів становила 2000 м/с, теплота вибухового перетворення – 280 кДж/кг. Ініціювання зарядів здійснювали шляхом електропідриву тонкого ніхромового дроту [16, 17].

В експериментах були використані заряди масою 0,5 г (наведений радіус заряду $R_0 = 0,5$ см). Криволінійні заряди формувалися подовженими гнучкими оболонками з внутрішнім діаметром 3 мм, радіус дуги такого заряду дорівнював 20 мм. Глибина розташування – 8 см.

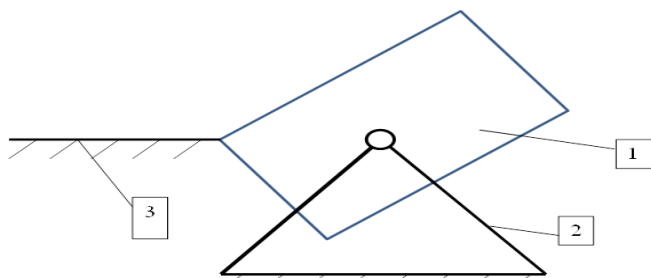


Рис. 1 Схема проведення експериментів (1 – смінь з піском; 2 – опора; 3 – горизонтальна поверхня)

Після кожного вибуху фіксували: поздовжній та поперечний профіль навалу ґрунту на горизонтальній поверхні; зміну маси викинутого ґрунту в різних частинах навалу.

У процесі вибуху проводили швидкісну кінозйомку процесу розльоту ґрунту, обробка кадрів якої дозволяла визначити швидкісні характеристики ядра викиду та оцінити вплив на них основних параметрів заряду. Характерні кадри швидкісної кінозйомки наведені на рис. 2.



Рис. 2. Кадри швидкісної кінозйомки процесу вибуху (А – зосереджений заряд; Б – кільцевий заряд; В – заряд 2/3 кола; час між кадрами – 0,06 с)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Обробка результатів експериментів (рис. 3, 4) довела істотний вплив форми заряду і його просторового розташування на кінцеві результати вибуху. Застосування криволінійного заряду змінює характер руху частинок ґрунту, що особливо важливо для спрямованого обвалення. Встановлено, що маса викинутого ґрунту в центральній частині навалу (смуга шириною $10R_0$) для зосередженого заряду склала 0,44 кг (30% загальної маси викинутої породи), для кільцевого – 0,38 кг (28%), для заряду 2/3 кола – 0,53 кг (42%). Використання криволінійних зарядів дозволяє керувати профілем навалу:

- на 25% зростає маса ґрунту, покладеного в центральну частину;
- довжина основної частини збільшується майже в 5 разів;
- ширина центральної частини зменшується в 2...3 рази;
- у порівнянні з використанням зосередженого заряду висота навалу зростає (так, наприклад, на відстані $40R_0$ висота зросла майже в 6 разів)

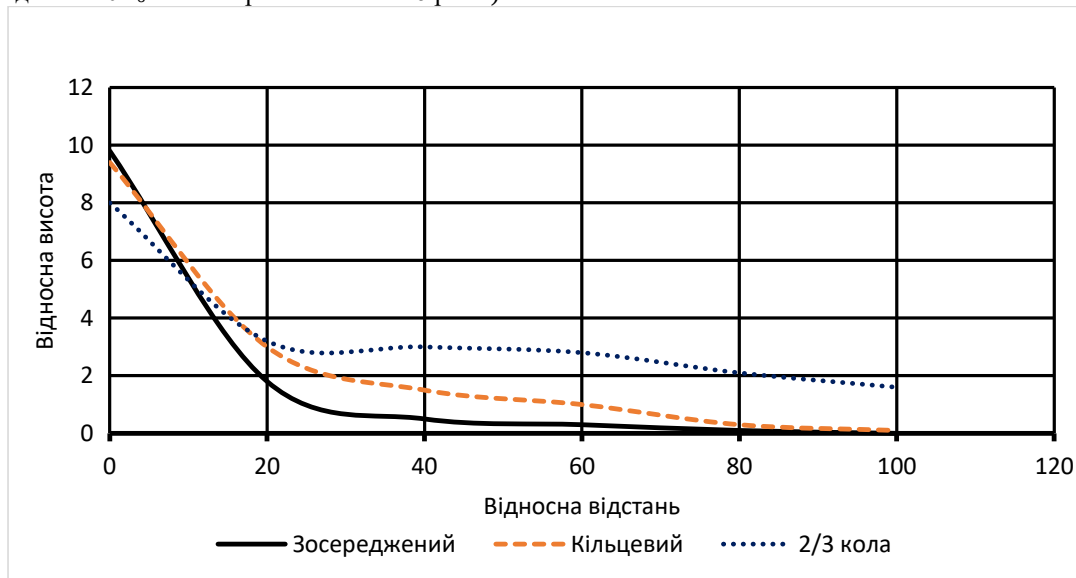


Рис. 3 Зміна позовжнього профілю навалу вздовж осі викиду в залежності від конструкції заряду

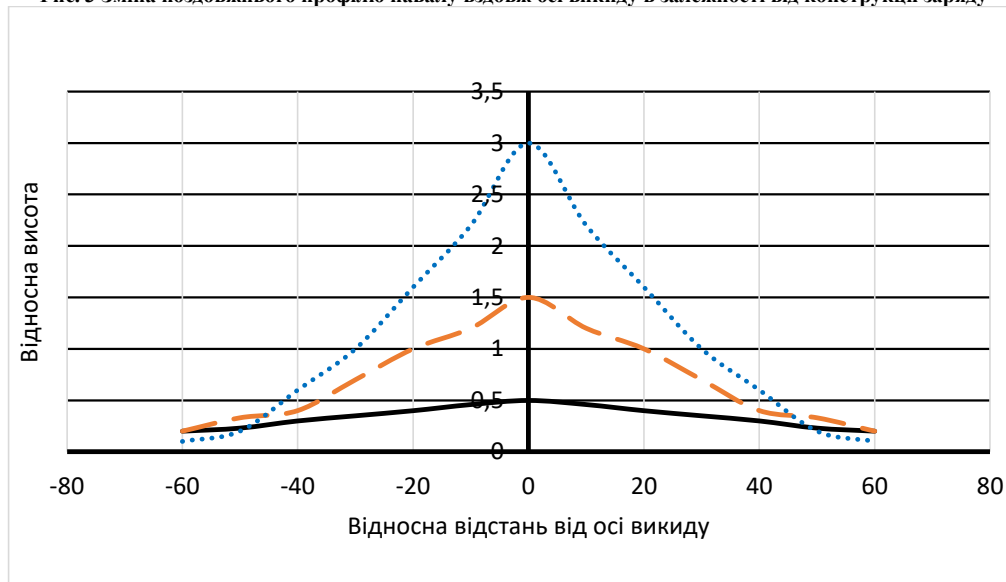


Рис. 4. Вплив конструкції заряду на зміну параметрів поперечного перерізу профілю навалу на відстані $40R_0$ від основи схилу (має однакові позначення, що і на рис. 3)

Виконані експерименти також довели, що криволінійний заряд у вигляді 2/3 кола має переваги у ефективності перед кільцевим: на 30% зростає маса ґрунту в проектному контурі перемички; спостерігається більш плавне зменшення висоти навалу вздовж осі викиду; майже вдвічі збільшується довжина навалу. Також при виконанні підготовчих робіт щодо вибухів на схилі основні проблеми можуть виникати при формуванні криволінійних зарядів. Тому напрямом подальших досліджень є розробка й дослідження можливості заміни криволінійного заряду системою свердловинних зарядів.

Література

1. Huang, Y., Liu, D., & Li, S. (2014). Numerical simulation on pin-point blasting of sloping surface. *Explosion and Shock Waves*. Vol. 34(4). 495-500. [https://doi.org/10.11883/1001-1455\(2014\)04-0495-06](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2014)04-0495-06).
2. Singh, S. P. (2000). New trends in drilling and blasting technology. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 14(4). 305–315. <https://doi.org/10.1080/13895260008953338>.
3. Chen, Y. (2019). Numerical simulation of dynamic damage and stability of a bedding rock slope under blasting load. *Shock and Vibration*. Vol. 1. 55-64.
4. Воробйова, Л.Д., Воробйов, В. В., & Пєєва, І.Е. (2022). Посилення динамічного навантаження нижніх шарів масиву при вибуху свердловинного заряду. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 1 (132), 127-133.
5. Воробйов, В.В., Воробйова, Л.Д., & Пастушенко, Р.М. (2023). Динаміка зміни тиску в зоні повітряного проміжку в разі застосування кумулятивного ефекту. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 3 (140), 86-95.
6. Choudhary, B.S. (2013). Firing patterns and its effect on muck pile shape parameters and fragmentation in quarry blasts. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Vol. 2, 32-45.
7. Esen, S., & Nagarajan, M. (2015, august). Muck pile shaping for draglines and dozers at surface coalmines. *11th International symposium on rock fragmentation by blasting*, pp. 1-8.
8. Твердая, О. Я., & Воробйов, В. Д. (2015). Взаємозв'язок параметрів розвалу гірничої маси з напрямком відбійки під час вибухового відпрацювання високих уступів на кар'єрах. *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*, 1(15), 63–73.
9. Узбекистан збудує 21 гідроелектростанцію за п'ять років. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://fergana.media/news/124058/>.
10. Ibragimov, K.S., Brovko, I.S., & Usenkulov, Zh.A. (2020). Problems of construction of soil structures by directional blasting. *Bulletin of the Kazakh Head Academy of Architecture and Civil Engineering*, 1 (75), 200 - 207.
11. Худайбердієв, А.Р., & Жанчаров, Ж.У. (2013). Використання великомасштабного вибуху під час зведення греблі Камбаратинської ГЕС-2 на річці Нарин у Киргизькій республіці. *Наука і нові технології*, 2, 34-42.
12. Malikov, B.K. (2014). On the problems of large-scale explosions on mountain slopes and measuring the detonation velocity of explosive charges. *Bulletin of KRSU*, Vol. 14, No. 7, 64 – 68.
13. Casale, M., Oggeri, C., Peila, & D. (2008). Improvements of safety conditions of unstable rock slopes through the use of explosives. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, Vol. 8, 473–481. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-473-2008>.
14. Bhagat, N. K., Mishra, A. K., & Singh, M. M. (2020). Blasting Technique for Stabilizing Accident-Prone Slope for Sustainable Railway Route. *Current Science*, Vol. 6, 901–909. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.jstor.org/stable/27226384>.
15. Zhao, Ruixin, Feng, Zhongju, Huo, Jianwei, Jiang, Guan, & Wang, Fuchun. (2020). Stability Analysis of Blasting Excavation for High Rock Slope of Highway Reconstruction and Expansion. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 12. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2022/5447614>.
16. Терентьев О. М., Гонтарь П.А., & Шукуров А.А. (2016). Энергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння. *Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал*, № 5(109), 17–23.
17. Закусило В.Р., Романченко А.Н., & Закусило Р.В. (2015). Гетерогенні вибухові склади піротехнічного типу. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, вип. 27, 60 – 66.

References

1. Huang, Y., Liu, D., & Li, S. (2014). Numerical simulation on pin-point blasting of sloping surface. *Explosion and Shock Waves*. Vol. 34(4). 495-500. [https://doi.org/10.11883/1001-1455\(2014\)04-0495-06](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2014)04-0495-06).
2. Singh, S. P. (2000). New trends in drilling and blasting technology. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 14(4). 305–315. <https://doi.org/10.1080/13895260008953338>.
3. Chen, Y. (2019). Numerical simulation of dynamic damage and stability of a bedding rock slope under blasting load. *Shock and Vibration*. Vol. 1. 55-64.
4. Vorobiova, L.D., Vorobiov, V. V., & Pieieva, I.E. (2022). Posylennia dynamichnoho navantazhennia nyzhnykh shariv masyvu pry vybukhu sverdlvynnoho zariadu. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 1 (132), 127-133.
5. Vorobiov, V.V., Vorobiova, L.D., & Pastushenko, R.M. (2023). Dynamika zminy tysku v zoni povitrianoho promizhku v razii zastosuvannia kumuliatyvnoho efektu. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 3 (140), 86-95.
6. Choudhary, B.S. (2013). Firing patterns and its effect on muck pile shape parameters and fragmentation in quarry blasts. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Vol. 2, 32-45.
7. Esen, S., & Nagarajan, M. (2015, august). Muck pile shaping for draglines and dozers at surface coalmines. *11th International symposium on rock fragmentation by blasting*, pp. 1-8.

8. Tverdaia, O. Ya., & Vorobiov, V. D. (2015). Vzaiemozviazok parametriv rozvalu hirnychoi masy z napriamkom vidbiiky pid chas vybukhovoho vidpratsiuvannia vysokikh ustupiv na karierakh. Suchasni resursozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva, 1(15), 63–73.
9. Uzbekystan zbuduie 21 hidroelektrostantsiiu za piat rokiv. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://fergana.media/news/124058/>.
10. Ibragimov, K.S., Brovko, I.S., & Usenkulov, Zh.A. (2020). Problems of construction of soil structures by directional blasting. Bulletin of the Kazakh Head Academy of Architecture and Civil Engineering, 1 (75), 200 - 207.
11. Khudaiberdiiev, A.R., & Zhancharov, Zh.U. (2013). Vykorystannia velykomasshtabnoho vybukhu pid chas zvedennia hrebli Kambaratynskoi HES-2 na richtsi Naryn u Kyrhyzkii respublitsi. Nauka i novi tekhnolohii, 2, 34-42.
12. Malikov, B.K. (2014). On the problems of large-scale explosions on mountain slopes and measuring the detonation velocity of explosive charges. Bulletin of KRSU, Vol. 14, No. 7, 64 – 68.
13. Casale, M., Oggeri, C., Peila, & D. (2008). Improvements of safety conditions of unstable rock slopes through the use of explosives. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, Vol. 8, 473–481. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-473-2008>.
14. Bhagat, N. K., Mishra, A. K., & Singh, M. M. (2020). Blasting Technique for Stabilizing Accident-Prone Slope for Sustainable Railway Route. Current Science, Vol. 6, 901–909. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.jstor.org/stable/27226384>.
15. Zhao, Ruixin, Feng, Zhongju, Huo, Jianwei, Jiang, Guan, & Wang, Fuchun. (2020). Stability Analysis of Blasting Excavation for High Rock Slope of Highway Reconstruction and Expansion. Advances in Civil Engineering, Vol. 12. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2022/5447614>.
16. Terentiev O. M., Hontar P.A., & Shukurov A.A. (2016). Enerhetichni parametry kumuliatyvnoho vybukhovoho yadra pid chas vybukho-mekhanichnoho burinnia. Naukovi visti NTUU «KPI»: naukovo-tekhnichnyi zhurnal, № 5(109), 17–23.
17. Zakusylo V.R., Romanchenko A.N., & Zakusylo R.V. (2015). Heterohenni vybukhovi sklady pirotekhnichnoho typu. Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnytstvo», vyp. 27, 60 – 66.