

Вплив варіативності розмірів уламків на ефективність роботи екскаваторів у гірничих роботах*(Представлено к.т.н., доц. Іськовим С.С.)*

У статті розглядається вплив гранулометричного складу вибухових гірських порід на ефективність роботи екскаваторів у гірничих роботах. Особлива увага приділяється впливу розподілу розмірів уламків, зокрема логарифмічної дисперсії, на тривалість циклу завантаження та продуктивність екскаваторів. На прикладі кар'єру ТОВ «Давидівський гранкар'єр» проведено хронометражні спостереження за роботою екскаваторів, де використано програмне забезпечення WipFrag 3 для вимірювання гранулометричного складу вибухових порід. Визначено, що середній розмір шматка гірської породи та його дисперсія значно впливають на продуктивність екскаваторів: з підвищенням дисперсії час завантаження зростає через збільшення опору ковша екскаватора. При низькій дисперсії ($D = 0,8$) продуктивність екскаватора зменшується на 23,6 %, при середній дисперсії ($D = 1,0$) – на 27,1 %, а при високій дисперсії ($D = 1,35$) – на 31 %. Стаття підкреслює важливість зменшення варіативності розмірів фрагментів для підвищення ефективності роботи екскаваторів. Результати дослідження дозволяють зробити висновок, що для максимізації продуктивності екскаваторів необхідно контролювати гранулометричний склад вибухових порід, оскільки зменшення дисперсії призводить до зменшення часу на завантаження та підвищення ефективності гірничих робіт.

Ключові слова: екскаватори; гранулометричний склад; дисперсія; продуктивність; вибухові роботи; гірничі роботи; час завантаження.

Вступ. У сучасних гірничих роботах вибухові роботи займають важливе місце в процесі видобутку корисних копалин. Одним з ключових факторів, що визначають ефективність екскаваторів при роботі з вибуховими гірськими породами, є гранулометричний склад вибухової гірської маси. Від характеристик розподілу розмірів уламків залежить не лише процес завантаження автосамоскидів, але й загальна продуктивність гірничого обладнання.

Ця стаття присвячена дослідженню впливу гранулометричного складу вибухових гірських порід на ефективність роботи екскаваторів на прикладі кар'єру ТОВ «Давидівський гранкар'єр». За допомогою хронометражних спостережень і програмного забезпечення WipFrag 3 було визначено, як різні значення середнього розміру шматка та логарифмічної дисперсії впливають на час завантаження і, відповідно, на продуктивність екскаваторів.

Зміни у розподілі фракцій гірських порід після вибуху безпосередньо пов'язані з підвищенням або зниженням опору ковша екскаватора, що визначає тривалість робочого циклу і кінцеву продуктивність обладнання. У цьому дослідженні також представлені математичні моделі для розрахунку зміни продуктивності залежно від параметрів вибухових робіт.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми. У сучасних гірничих роботах вибухові роботи займають важливе місце в процесі видобутку корисних копалин. Одним із ключових факторів, що визначають ефективність використання гірничого обладнання, зокрема екскаваторів, є гранулометричний склад вибухових порід. Від характеристик розподілу розмірів уламків залежить не лише процес завантаження автосамоскидів, але й загальна продуктивність екскаваторів.

Питання впливу гранулометричного складу вибухових порід на ефективність роботи екскаваторів розглядається у численних дослідженнях, де встановлено, що оптимізація вибухових робіт з урахуванням цього параметра може значно підвищити продуктивність гірничих робіт.

Зокрема, у дослідженнях Т.Когман et al. [1] наголошується на важливості властивостей гірських порід, зокрема їх гранулометрії, для підвищення продуктивності екскаваторів. Автори зазначають, що правильний вибір порід і параметрів вибухових робіт дозволяє значно зменшити час циклу завантаження і знизити опір ковша екскаватора.

Дослідження Е.Ясар et al. [2] підтверджують, що фізико-механічні властивості гірських порід (як-от міцність та тріщинуватість) значно впливають на вибухову фрагментацію породи, що своєю чергою впливає на ефективність роботи екскаваторів. Порівняно з порідними масами з високою міцністю породи з низькою міцністю потребують більш точних налаштувань вибухових робіт для зменшення опору при завантаженні.

У роботах M.S. Dotto та Y.Pourrahimian [3] наголошується на важливості фрагментації порід для ефективності роботи навантажувально-транспортного комплексу. Автори вказують, що правильне визначення розміру фрагментів допомагає знизити витрати часу на завантаження та оптимізувати роботу екскаватора, що дозволяє збільшити кількість автосамоскидів, завантажених за одну зміну.

Також у роботах S.Singh et al. [4] розглядається вплив вибухових робіт на роботу навантажувальних машин. Вони зазначають, що значна варіативність розмірів уламків, характерна для високої дисперсії, створює додаткові труднощі в процесі завантаження, оскільки великі шматки важче захоплюються ковшем екскаватора. Це веде до зниження продуктивності і збільшення часу циклу завантаження.

Загалом проведений аналіз літератури свідчить про значний вплив гранулометричного складу на ефективність роботи екскаваторів. Однак більшість існуючих досліджень обмежуються загальними характеристиками розмірів уламків і не враховують усі можливі варіанти їх розподілу залежно від конкретних умов роботи. Проблема, що постає, полягає в необхідності глибшого вивчення цього впливу з урахуванням логарифмічної дисперсії, яка є важливим фактором для оптимізації вибухових робіт.

Для максимізації продуктивності екскаваторів важливо знижувати варіативність розмірів фрагментів, оскільки це значно зменшує час циклу завантаження і підвищує ефективність роботи обладнання. Отже, вивчення та контролювання гранулометричного складу вибухових порід є ключовим для підвищення загальної продуктивності гірничих робіт.

Метою дослідження є аналіз і оцінка впливу гранулометричного складу на продуктивність екскаваторів, а також розробка рекомендацій щодо оптимізації вибухових робіт з урахуванням гранулометричних характеристик гірських порід для підвищення ефективності гірничодобувних процесів.

Викладення основного матеріалу. Для вивчення впливу гранулометричного складу вибухових гірських порід на продуктивність гірничого обладнання на кар'єрі ТОВ «Давидівський гранкар'єр» були проведені хронометражні спостереження за роботою екскаваторів. За період спостережень екскаваторами ЕКГ-5А було завантажено понад 200 автосамоскидів БелАЗ-7548.

Встановлено, що продуктивність екскаватора залежить не тільки від середнього розміру шматка, але й від розподілу гранулометричного складу, яке можна охарактеризувати логарифмічною дисперсією. Вимірювання гранулометричного складу проводилися за допомогою програмного забезпечення WipFrag 3 (рис. 1) безпосередньо в забої екскаватора. Міцність порід на кар'єрах варіюється від 16 до 18 за шкалою проф. М.М. Протод'яконова, категорія за тріщинуватістю II-IV, при цьому переважає категорія III.

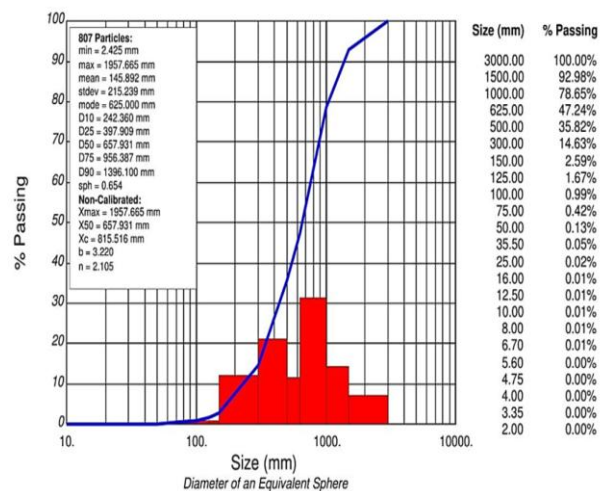
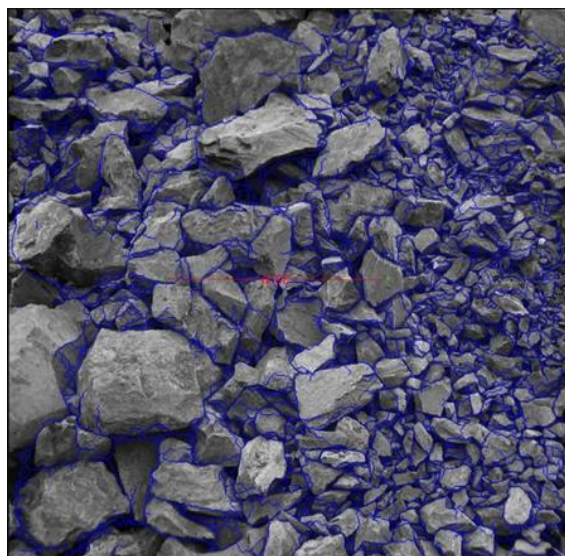


Рис. 1. Вигляд зображення під час обробки в програмному продукті WipFrag 3

Середній розмір шматка після вибуху змінювався в межах від 0,1 до 1,6 м, а логарифмічна дисперсія – від 0,8 до 1,35.

Дисперсія в контексті гранулометричного складу вибухових гірських порід є статистичним показником, що характеризує рівень варіативності або розкиду розмірів часток гірської маси. Чим більша дисперсія, тим більші відмінності між розмірами уламків.

$D = 0,8$ – це показник низької дисперсії. Вибухова маса має відносно рівномірний розподіл розмірів уламків, що означає, що більшість уламків схожі за розміром. Уламки, що утворюються при вибуху, не сильно різняться за розмірами. Це спрощує роботу екскаватора, оскільки ковш може ефективно

захоплювати частки без великого опору. Наявність менших фракцій також полегшує процес завантаження, що дозволяє зберегти високу продуктивність екскаватора. Такий розподіл часто є бажаним, оскільки він дозволяє екскаватору працювати з максимальною ефективністю.

$D = 1,0$ – це середній рівень дисперсії. Уламки гірської породи в такій масі мають більш варіативний розподіл, тобто середні й більші фрагменти породи починають з'являтися частіше. При такому розподілі розміри часток різняться, і на деякі великі уламки ковш екскаватора може відчувати додатковий опір при їх захопленні. Це вже може призвести до збільшення часу на виконання одного циклу завантаження. Проте екскаватор ще здатен ефективно працювати з такою масою, хоча наявність більших уламків може трохи знизити його продуктивність.

$D = 1,35$ – це високий рівень дисперсії, що означає значну різницю між розмірами уламків. У вибуховій масі буде велика кількість великих шматків породи, що створює значний опір ковшу екскаватора. Великі уламки важче захопити, вони можуть перекрити менші частки або створювати додаткові труднощі при їх вийманні з копна. Це збільшує час на кожен цикл завантаження, що своєю чергою знижує загальну продуктивність екскаватора. У таких випадках екскаватор може працювати менш ефективно, оскільки великі фрагменти часто забивають ковш, ускладнюючи процес і зменшуючи кількість часток, що можуть бути захоплені за один прохід.

У результаті хронометражних спостережень були отримані залежності зміни часу черпання (рис. 2) і завантаження, тривалість циклу від середнього розміру шматка вибухової гірської маси при різних значеннях логарифмічної дисперсії розподілу гранулометричного складу.

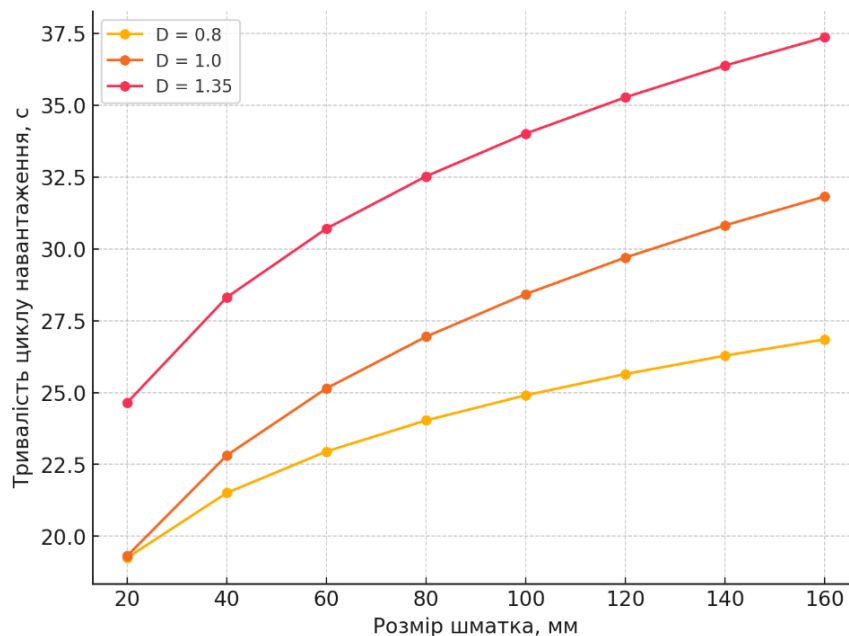


Рис. 2. Хронометраж тривалості циклу екскаватора ЕКГ-5 від розміру шматка

Лінія $D = 0,8$ відображає низьку дисперсію, що свідчить про відносно однорідний розподіл розмірів шматків. Вибухова маса з такою дисперсією характеризується тим, що більшість уламків мають подібні розміри, і різниця між ними не є значною. Як видно з графіка, зі збільшенням середнього розміру шматка тривалість циклу завантаження збільшується, але це зростання є помірним і не дуже різким. Наприклад, при середньому розмірі шматка 20 мм тривалість циклу складає приблизно 20 с, а при розмірі 160 мм – близько 35 с.

Це означає, що при низькій дисперсії, навіть з підвищенням середнього розміру фрагментів, час завантаження збільшується незначно, що є позитивним аспектом для ефективності роботи екскаватора. Такий рівень дисперсії дозволяє екскаватору працювати більш стабільно, оскільки великі шматки не створюють великого опору при захопленні ковшем.

Лінія $D = 1$ демонструє середню дисперсію, що вказує на більшу варіативність розмірів уламків. При такому розподілі уламки можуть суттєво різнитися за розмірами, що вже створює більший опір ковша екскаватора. Як видно з графіка, час циклу завантаження збільшується швидше, ніж при низькій дисперсії. Наприклад, при розмірі 20 мм час циклу становить 22 с, а при розмірі 160 мм – вже близько 34 с.

Це вказує на те, що при середній дисперсії час завантаження значно збільшується з підвищенням розміру шматка, і це збільшення є більш вираженим порівняно з низькою дисперсією. Уламки різних розмірів починають ускладнювати процес завантаження, що збільшує час кожного циклу.

Лінія $D = 1,35$ представляє високу дисперсію, що свідчить про велику різницю в розмірах уламків. Вибухова маса з високою дисперсією має багато великих шматків, які значно ускладнюють роботу екскаватора. Як видно з графіка, час циклу зростає найбільш стрімко, що свідчить про значне збільшення часу завантаження при підвищенні середнього розміру шматка. Наприклад, при розмірі 20 мм час циклу складає близько 25 с, а при розмірі 160 мм – близько 37 с.

Це свідчить про те, що при високій дисперсії великий розмір шматків породжує значний опір ковша екскаватора, що своєю чергою збільшує час на завантаження. Великі фрагменти, що часто забивають ковш, змушують екскаватор працювати з меншими темпами, що негативно позначається на загальній продуктивності.

Час циклу завантаження екскаватора зростає із підвищенням середнього розміру шматка, що є логічним і очікуваним результатом. Однак це зростання є більш вираженим при високій дисперсії, де великий розмір уламків значно ускладнює процес завантаження.

Низька дисперсія ($D = 0,8$) забезпечує стабільну продуктивність екскаватора. Хоча розмір фрагментів збільшується, час на завантаження зростає помірно, що дозволяє підтримувати ефективність роботи обладнання.

Середня дисперсія ($D = 1,0$) вже призводить до значного збільшення часу завантаження, оскільки в масі з'являються частки різних розмірів, що створюють додаткові труднощі при завантаженні.

Висока дисперсія ($D = 1,35$) є найбільш небажаною для роботи екскаватора, оскільки значна варіативність в розмірах уламків створює максимальний опір ковшу, що значно збільшує час циклу і знижує продуктивність екскаватора.

Загалом оптимальний гранулометричний склад вибухової маси передбачає зменшення дисперсії, що сприяє зниженню часу завантаження і підвищенню ефективності екскаваторів.

Для розрахунку змінної продуктивності екскаватора залежно від середнього розміру шматка гірничої маси (рис. 3) можна використовувати стандартну формулу продуктивності екскаватора:

$$Q = \frac{3600 \cdot E \cdot T_{зм} \cdot k_e \cdot k_b \cdot k_o}{t_{ц}}, \text{ м}^3/\text{зм},$$

де Q – змінна продуктивність екскаватора, $\text{м}^3/\text{зм}$;

E – ємність ковша екскаватора, м^3 ;

$T_{зм}$ – тривалість робочої зміни, год;

k_e – коефіцієнт ефективності екскаватору (враховує ефективність роботи екскаватора $k_e = 0,6 - 1$),

k_b – коефіцієнт впливу параметрів вибою (враховує вплив вибухових робіт на продуктивність $k_b = 0,85 - 0,9$),

k_o – коефіцієнт використання обладнання у часі (зазвичай $k_o = 0,7$);

$t_{ц}$ – тривалість циклу завантаження залежить від середнього розміру шматка гірської маси, с.

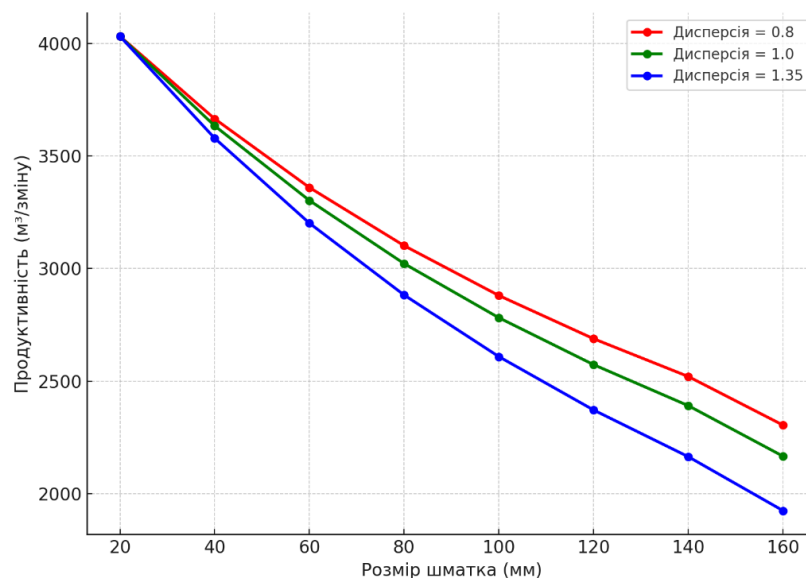


Рис. 3. Хронометраж тривалості циклу екскаватора ЕКГ-5 від розміру шматка

Графік показує, як змінюється продуктивність екскаватора залежно від розміру шматка гірської породи при різних значеннях дисперсії. Для низької дисперсії ($D = 0,8$), де уламки мають схожі розміри, продуктивність екскаватора при малих шматках (20 мм) становить $5040 \text{ м}^3/\text{зміну}$, а при великих шматках

(160 мм) – 3850 м³/зміну. Це означає, що при збільшенні розміру шматка продуктивність зменшується на 23,6 % (від 5040 до 3850 м³/зміну).

При середній дисперсії ($D = 1,0$), де уламки мають більшу варіативність розмірів, продуктивність екскаватора при малих шматках (20 мм) становить 4832 м³/зміну, а при великих шматках (160 мм) – 3523 м³/зміну. В цьому випадку продуктивність зменшується на 27,1 % (від 4832 до 3523 м³/зміну). Це зростання часу циклу завантаження є більш вираженим порівняно з низькою дисперсією, оскільки більші уламки створюють більший опір ковшу екскаватора.

Для високої дисперсії ($D = 1,35$), коли більшість уламків мають великі розміри, продуктивність при розмірі 20 мм складає 4623 м³/зміну, а при розмірі 160 мм – 3187 м³/зміну. Тут продуктивність зменшується на 31,0 % (від 4623 до 3187 м³/зміну). Це свідчить про те, що при високій дисперсії великі фрагменти породжують значний опір ковшу екскаватора, що збільшує час завантаження і знижує загальну продуктивність.

Таким чином, збільшення дисперсії від 0,8 до 1,35 призводить до значного зниження продуктивності екскаватора. Від низької до високої дисперсії продуктивність зменшується на 23,6, 27,1 і 31,0 % відповідно, що підкреслює негативний вплив великих фрагментів на ефективність роботи екскаватора. З цього можна зробити висновок, що для забезпечення максимальної продуктивності необхідно контролювати дисперсію вибухових порід, щоб уникнути значного зниження ефективності екскаватора через великі уламки.

Висновки. Продуктивність екскаватора зменшується з підвищенням дисперсії гранулометричного складу вибухової гірської маси. При низькій дисперсії ($D = 0,8$) продуктивність зменшується на 23,6 % (від 5040 до 3850 м³/зміну), при середній дисперсії ($D = 1,0$) – на 27,1 % (від 4832 до 3523 м³/зміну) і при високій дисперсії ($D = 1,35$) – на 31,0 % (від 4623 до 3187 м³/зміну).

Висока дисперсія найбільше негативно впливає на продуктивність, оскільки великі фрагменти породжують значний опір ковшу екскаватора, що збільшує час на завантаження і знижує ефективність роботи. Натомість низька дисперсія дозволяє зберігати високу продуктивність навіть при збільшенні середнього розміру шматків, оскільки уламки подібного розміру зменшують опір при захопленні ковшем. Для максимізації продуктивності екскаваторів важливо знижувати варіативність розмірів фрагментів, що значно зменшує час циклу завантаження і підвищує ефективність обладнання. Отже, контроль за гранулометричним складом вибухової гірської маси є критично важливим для оптимізації роботи екскаваторів і зменшення витрат часу на завантаження.

References:

1. Korman, T., Klanfar, M., Brisevac, Z. et al. (2021), «Influence of Crushed Rock Properties on the Productivity of a Hydraulic Excavator», *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5, pp. 1–15, [Online], available at: <https://www.researchgate.net/publication/349882445>
2. Yasar, E., Kilic, A.M., Ranjith, P.G. et al. (2009), «Influence of Rock Mass Properties on Blasting Efficiency», *Scientific Research and Essays*, Vol. 4, No. 11, pp. 1213–1224, [Online], available at: <https://www.researchgate.net/publication/267216721>
3. Dotto, M.S. and Pourrahimian, Y. (2018), «Effects of Fragmentation Size Distribution on Truck-Shovel Productivity», *Mining Optimization Laboratory Report*, pp. 335–342, [Online], available at: https://sites.ualberta.ca/dept/civeng/mol/DataFiles/2018_Papers/401%20%20Effects%20of%20Fragmentation%20Size%20Distribution%20on%20Truck-Shovel%20Productivity.pdf
4. Singh, S., Narendrula, R., Duffy, D. et al. (2005), «Influence of Blasted Muck on the Performance of Loading Equipment», *Proceedings of the 3rd EFEE World Conference on Explosives and Blasting*, Vol. 8, Issue 12, pp. 731–734, [Online], available at: <https://www.ijert.org/research/the-influence-of-blasting-energy-factor-on-the-loading-performance-IJERTV8IS120360.pdf>
5. Osanloo, M. and Hekmat, A. (2005), «Prediction of Shovel Productivity in the Gol-e-Gohar Iron Mine», *Journal of Mining Science*, Vol. 41, No. 2, pp. 177–184, [Online], available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-005-0025-0>
6. Singh, P.K., Roy, M.P., Paswan, R.K. et al. (2016), «Rock Fragmentation Control in Opencast Blasting», *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 225–237, doi: 10.1016/j.jrmge.2015.10.004.

Качуровський Михайло Валентинович – аспірант кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- процеси гірничого виробництва;
- обробка каменю.

Соколовський Володимир Олегович – аспірант кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- геоінформаційні системи в гірництві;
- процеси гірничого виробництва;
- обробка каменю.

Kachurovskyi M.V., Sokolovskyi V.O.

Impact of fragment size variability on excavator efficiency in mining operations

This paper examines the impact of the granulometric composition of blasted rock on the performance of excavators in mining operations. Special attention is given to the effect of fragment size distribution, specifically logarithmic dispersion, on the loading cycle duration and excavator productivity. Chronometric observations were conducted at the Davydivskyi Granite Quarry, where WipFrag 3 software was used to measure the granulometric composition of the blasted rocks. It was determined that the average size of rock fragments and their dispersion significantly affect excavator productivity: as dispersion increases, the loading time increases due to higher resistance of the excavator bucket. With low dispersion ($D = 0,8$), excavator productivity decreases by 23,6 %, with medium dispersion ($D = 1,0$) by 27,1 %, and with high dispersion ($D = 1,35$) by 31 %. The study highlights the importance of reducing the variability in fragment sizes to improve the efficiency of excavators. The results of the research suggest that controlling the granulometric composition of blasted rock is crucial for maximizing excavator productivity, as reducing dispersion leads to decreased loading time and increased mining operation efficiency.

Keywords: excavators; granulometric composition; dispersion; productivity; blasting; mining operations; loading time.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2025.