

Державний університет «Житомирська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СОКОЛОВСЬКИЙ Володимир Олегович**

УДК 622.2:622.235

**ДИ С Е Р Т А Ц І Я**

**ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ МІНІМІЗАЦІЇ СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ  
ВИБУХОВИХ РОБІТ У ГРАНІТНИХ КАР'ЄРАХ З ГЕОЛОГІЧНИМИ  
ПОРУШЕННЯМИ**

Спеціальність 184 Гірництво

Галузь знань 18 – виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_/ В. О. Соколовський

Науковий керівник Іськов Сергій Станіславович, к.т.н., доцент

Житомир – 2026

## АНОТАЦІЯ

**Соколовський В.О. Технологічні рішення мінімізації сейсмічного впливу вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями** – наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 Гірництво. – Державний університет «Житомирська політехніка», 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі – розробці ефективних технологічних рішень з мінімізації сейсмічного впливу масових вибухових робіт у гранітних кар'єрах, розташованих у масивах з геологічними порушеннями (тектонічними розломами та зонами підвищеної тріщинуватості). Актуальність дослідження зумовлена стратегічною важливістю гранітного щебеню для економіки України, особливо в умовах повоєнного відновлення та масштабної реконструкції інфраструктури. Гранітний щебінь є базовим компонентом бетону, асфальтобетону, залізобетонних конструкцій, дорожніх покриттів та фундаментів. Його якісні характеристики (міцність, морозостійкість, лещадність, зерновий склад) безпосередньо визначають довговічність і надійність споруд.

До 2022 року галузь демонструвала стабільне зростання з річним обсягом видобутку близько 120 млн тонн, задовольняючи 70–80 % внутрішнього попиту та частково експорт. Основні потужності зосереджені в гранітних кар'єрах Українського щита (Житомирська, Вінницька, Київська, Кіровоградська області). Повномасштабне вторгнення Російської Федерації у 2022 році спричинило глибоку кризу: у 2023 році обсяги видобутку скоротилися приблизно на 50 % (до ~60 млн тонн) через окупацію родовищ, пошкодження обладнання, порушення логістики, зростання собівартості енергоносіїв і дефіцит кваліфікованих кадрів. У 2024–2025 роках спостерігається поступове відновлення до 70–80 млн тонн, переважно в центральних і західних регіонах, де зосереджено інтенсивне будівництво для відбудови. У 2026 році галузь зберігає високий потенціал зростання, однак потребує технологічної модернізації для підвищення ефективності, якості продукції та безпеки робіт.

Буровибуховий метод залишається основним способом відбійки скельних порід і становить 30–40 % собівартості видобутку. Енергія вибуху не лише руйнує масив, але й генерує зони передруйнування з мережею техногенних мікротріщин, що знижує міцність, морозостійкість і форму зерен кінцевої продукції. Особливої гостроти проблема набуває в кар'єрах з геологічними порушеннями, де масові вибухи викликають анізотропне поширення сейсмічних і сейсмоакустичних хвиль, концентрацію напружень, додаткове тріщиноутворення блочних ділянок та ризики для супутнього видобутку блоків. Чинні українські норми (ДСТУ 4704:2008 та інші) потребують удосконалення з урахуванням міжнародних стандартів (DIN 4150, AS 2187.2) та локальних геологічних особливостей.

**У першому розділі** дисертації проведено комплексний аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку кар'єрів з виробництва щебеню в Україні. Розглянуто географію родовищ, структуру виробництва, вплив війни на обсяги видобутку по регіонах. Детально оцінено економічні, виробничі, логістичні та соціальні наслідки вторгнення. Проаналізовано цінову ситуацію на ринку щебеню станом на 2025 рік. Висвітлено фундаментальне протиріччя між необхідністю ефективного подрібнення породи та вимогою збереження природної структури каменю для товарної якості щебеню. На основі теорії Гріффітса та сучасних динамічних моделей руйнування розглянуто механізми техногенного тріщиноутворення під дією вибуху. Проведено порівняльний аналіз впливу різних типів вибухових речовин на якість продукції та екологію. Особливу увагу приділено впливу тектонічних розломів на параметри буровибухових робіт.

**У другому розділі** виконано глибокий порівняльний аналіз міжнародних стандартів нормування вибухових вібрацій (DIN 4150-3, USBM RI 8507, AS 2187.2, BS 7385, SN 640 312 та ін.) та чинних українських нормативних документів (ДСТУ 4704:2008, ДБН В.1.1-12:2014, НПАОП 0.00-1.66-13 та інші). Виявлено суттєві прогалини в українській нормативній базі, зокрема недостатнє врахування анізотропії гірського масиву, інтерференції хвиль від

розосереджених зарядів, частотного складу коливань та локальних геологічних умов. Показано, що більшість міжнародних стандартів використовують частотно-залежні критерії та деформаційні показники, що дозволяє більш гнучко регулювати вибухові роботи порівняно з жорсткими граничними значеннями PPV в українських нормах.

У підрозділі 2.2 детально досліджено вплив діаметра свердловини та інших конструктивних параметрів заряду на генерацію пружних сейсмічних хвиль. Встановлено кількісні залежності між діаметром свердловини, масою заряду, швидкістю детонації, домінуючою частотою коливань та рівнем сейсмічного впливу (PPV) на різних відстанях. Показано, що збільшення діаметра свердловини призводить до зростання енергії вибуху, але одночасно змінює частотний спектр коливань, що має важливе значення для прогнозування сейсмічної дії та оптимізації параметрів БВР. Отримані результати дозволяють обґрунтовано підходити до вибору діаметра свердловин залежно від конкретних гірничо-геологічних умов, наявності охоронних зон та вимог щодо сейсмічної безпеки.

**У третьому розділі** «Аналіз впливу тектонічних розломів на сейсмоакустичні хвилі та стійкість блочних уступів при супутньому видобутку гранітів на щєбін» проведено основні експериментальні та теоретичні дослідження дисертації. На підставі комплексних натурних сейсмометричних вимірювань у реальних умовах гранітних кар'єрів вивчено механізми поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у тектонічно порушених масивах. Вперше отримано кількісні закономірності анізотропного поширення хвиль: коефіцієнт затухання  $\beta$  становить  $-1,442$  вздовж розлому проти  $-1,022$  поперек, а посилення пікової швидкості частинок (PPV) досягає 50–200 % уздовж осей геологічних розломів. Підтверджено наявність хвилеводного ефекту розломів, який суттєво впливає на дальність і інтенсивність поширення коливань.

Виконано оцінку впливу сейсмоакустичних хвиль від масових вибухів на тріщиноутворення та стійкість блочних уступів при супутньому видобутку гранітів. Встановлено кількісні залежності між рівнем вібрацій, параметрами

тріщинуватості та зниженням запасу міцності блочних масивів. Розраховано допустимі рівні вібрацій для збереження якості блочного каменю.

Запропоновано та науково обґрунтовано нову методологію визначення сейсмобезпечних відстаней і захисних ціликів між ділянками щебеневого та блочного видобутку з урахуванням анізотропії масиву, кута простягання основної системи тріщинуватості ( $\varphi = 0^\circ - 90^\circ$ ) та емпіричних коефіцієнтів. Це дозволяє забезпечити запас міцності блочних уступів до 29,3 рази.

Також удосконалено емпіричне моделювання прогнозування PPV шляхом інтеграції ефекту інтерференції розосереджених зарядів ( $N = 3 - 5,35$ ), ефективної маси заряду та масштабованої відстані, що забезпечує вищу точність порівняно з класичними залежностями типу Садовського.

**Мета дисертаційної роботи** полягає в розробці науково обґрунтованих технологічних рішень з мінімізації сейсмічного ризику масових вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями, спрямованих на зниження амплітуди сейсмічних та сейсмоакустичних вібрацій, забезпечення стійкості блочних уступів, підвищення якості гранітного щебеню та оптимізацію продуктивності.

**Об'єкт дослідження** – процеси масових вибухових робіт у гранітних кар'єрах, розташованих у тектонічно порушених масивах, включаючи генерацію, поширення та взаємодію сейсмічних і сейсмоакустичних хвиль та їх вплив на безпеку супутнього видобутку.

**Предмет дослідження** – технологічні параметри буровибухових робіт, механізми анізотропного поширення хвиль у зонах геологічних порушень, кількісні закономірності їх впливу на тріщиноутворення та методи мінімізації сейсмічного ризику.

**Методи досліджень:** аналіз наукової літератури та нормативних документів; натурні сейсмометричні вимірювання; емпіричне моделювання PPV з урахуванням інтерференції розосереджених зарядів та анізотропії масиву; порівняльний аналіз норм; математична статистика; експериментальна перевірка технологічних рішень.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше отримано кількісні закономірності анізотропного поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у гранітних масивах з геологічними розломами на основі комплексних натурних вимірювань (коефіцієнти затухання  $\beta = -1,442$  вздовж розлому проти  $-1,022$  поперек, посилення PPV на 50–200 %);
- вперше запропоновано та обґрунтовано нову методологію визначення сейсмобезпечних відстаней і захисних ціликів з урахуванням анізотропії, кута простягання тріщинуватості та емпіричних коефіцієнтів, що забезпечує запас міцності блочних уступів до 29,3 рази;
- удосконалено емпіричне моделювання прогнозування PPV шляхом інтеграції ефекту інтерференції розосереджених зарядів ( $N = 3-5,35$ ), ефективної маси заряду та масштабованої відстані;
- розроблено та експериментально підтверджено комплекс технологічних рішень (зменшення інтервалів уповільнення до 10–15 мс, орієнтація фронту підриву паралельно розломам, квадратна сітка свердловин, емульсійні ВР зі швидкістю детонації 4500–5000 м/с), що дозволяє знизити рівень вібрацій на 20–60 % без втрати ефективності фрагментації.

**Практичне значення** результатів дисертації полягає в можливості безпосереднього впровадження розроблених технологічних рішень у паспорти буровибухових робіт діючих гранітних кар'єрів. Це забезпечить підвищення якості щебеню (зростання частки кубовидної фракції на 8–15 %, підвищення марки за дробимістю на 100–200 одиниць), безпеку супутнього блочного видобутку, зниження ризику для прилеглих об'єктів інфраструктури та населення, зменшення соціальної напруги, спрощення отримання дозволів. Економічний ефект досягається за рахунок зниження собівартості видобутку на 5–12 %, скорочення витрат на додаткові заходи захисту та зменшення кількості негабаритів. Екологічний ефект – зниження викидів токсичних газів, пилу, шуму та техногенного впливу на масив.

Дисертація містить результати власних досліджень автора. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають відповідні посилання.

**Ключові слова:** гранітні кар'єри, буровибухові роботи, екскаватори, сейсмічні вібрації, геологічні розломи, тріщини, анізотропія хвиль, PPV, відкриті гірничі роботи, параметри вибуху, вибухові речовини, геометризація, гранітний щебінь, природний камінь, тектонічні порушення, експлуатаційні втрати, оцінка ресурсів блоки природного каменю, деформації.

## ABSTRACT

**Sokolovskyi V. O. Technological Solutions for Minimizing the Seismic Impact of Blasting Operations in Granite Quarries with Geological Disturbances** – a scientific work on the rights of a manuscript. Thesis for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 184 Mining. – Zhytomyr Polytechnic State University, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem – the development of effective technological solutions for minimizing the seismic impact of mass blasting operations in granite quarries located in rock masses with geological disturbances (tectonic faults and zones of increased fracturing).

The relevance of the research is determined by the strategic importance of granite crushed stone for the economy of Ukraine, especially in the conditions of post-war recovery and large-scale reconstruction of infrastructure. Granite crushed stone is a basic component of concrete, asphalt concrete, reinforced concrete structures, road surfaces, and foundations. Its quality characteristics (strength, frost resistance, flakiness index, and grain size distribution) directly determine the durability and reliability of structures.

Until 2022, the industry demonstrated stable growth with an annual production volume of about 120 million tons, satisfying 70–80 % of domestic demand and partially for export. The main capacities are concentrated in granite quarries of the Ukrainian Shield (Zhytomyr, Vinnytsia, Kyiv, and Kirovohrad regions). The full-scale invasion of the Russian Federation in 2022 caused a deep crisis: in 2023, production volumes decreased by approximately 50 % (to ~60 million tons) due to the occupation of deposits, damage to equipment, disruption of logistics, rising energy costs, and a shortage of qualified personnel. In 2024–2025, a gradual recovery to 70–80 million tons is observed, mainly in the central and western regions, where intensive construction for reconstruction is concentrated. In 2026, the industry maintains high growth potential; however, it requires technological modernization to increase efficiency, product quality, and operational safety.

The drilling and blasting method remains the primary method of breaking rock and accounts for 30–40 % of the production cost. The energy of the explosion not only destroys the rock mass but also generates zones of pre-destruction with a network of technogenic microcracks, which reduce the strength, frost resistance, and shape of the grains of the final product. The problem becomes particularly acute in quarries with geological disturbances, where mass explosions cause anisotropic propagation of seismic and seismoacoustic waves, stress concentration, additional fracturing in blocky areas, and risks for the accompanying extraction of blocks. The current Ukrainian norms (DSTU 4704:2008 and others) require improvement, taking into account international standards (DIN 4150, AS 2187.2) and local geological features.

**In the first chapter** of the dissertation, a comprehensive analysis of the current state and development trends of crushed stone production quarries in Ukraine was carried out. The geography of deposits, the structure of production, and the impact of the war on production volumes by region were examined. The economic, production, logistical, and social consequences of the invasion were assessed in detail. The price situation in the crushed stone market as of 2025 was analyzed. The fundamental contradiction between the need for efficient rock fragmentation and the requirement to preserve the natural structure of the stone for the commercial quality of crushed stone was highlighted. Based on Griffith's theory and modern dynamic models of destruction, the mechanisms of technogenic fracturing under the influence of blasting were considered. A comparative analysis of the impact of different types of explosives on product quality and ecology was performed. Particular attention was paid to the influence of tectonic faults on the parameters of drilling and blasting operations.

**In the second chapter**, a thorough comparative analysis of international standards for regulating blasting vibrations (DIN 4150-3, USBM RI 8507, AS 2187.2, BS 7385, SN 640 312, etc.) and current Ukrainian normative documents (DSTU 4704:2008, DBN V.1.1-12:2014, NPAOP 0.00-1.66-13, and others) was conducted. Significant gaps in the Ukrainian regulatory framework were identified, particularly the insufficient consideration of the anisotropy of the rock mass, wave interference from distributed charges, the frequency composition of vibrations, and local geological

conditions. It was shown that most international standards use frequency-dependent criteria and strain-based indicators, which allow for more flexible regulation of blasting operations compared to the rigid limit values of PPV in Ukrainian norms.

In subsection 2.2, the influence of borehole diameter and other design parameters of the charge on the generation of elastic seismic waves was studied in detail. Quantitative dependencies were established between borehole diameter, charge mass, detonation velocity, dominant vibration frequency, and the level of seismic impact (PPV) at various distances. It was demonstrated that an increase in borehole diameter leads to higher explosion energy, but at the same time changes the frequency spectrum of vibrations, which is important for predicting seismic action and optimizing blasting parameters. The obtained results allow for a well-founded approach to selecting borehole diameters depending on specific mining and geological conditions, the presence of protected zones, and seismic safety requirements.

**In the third chapter**, “Analysis of the Influence of Tectonic Faults on Seismoacoustic Waves and the Stability of Blocky Benches in the Accompanying Extraction of Granites for Crushed Stone,” the main experimental and theoretical studies of the dissertation were carried out. Based on comprehensive in-situ seismometric measurements in real quarry conditions, the mechanisms of propagation of seismic and seismoacoustic waves in tectonically disturbed rock masses were investigated. For the first time, quantitative patterns of anisotropic wave propagation were obtained: the attenuation coefficient  $\beta$  is  $-1,442$  along the fault versus  $-1,022$  across it, while the amplification of peak particle velocity (PPV) reaches 50–200 % along the axes of geological faults. The waveguide effect of faults, which significantly affects the range and intensity of vibration propagation, was confirmed.

An assessment was made of the impact of seismoacoustic waves from mass blasts on fracturing and the stability of blocky benches during the accompanying extraction of granites. Quantitative relationships were established between vibration levels, fracturing parameters, and the reduction in the safety factor of blocky rock masses. Permissible vibration levels for maintaining the quality of block stone were calculated.

A new methodology for determining seismically safe distances and protective pillars between crushed stone and block extraction sites was proposed and scientifically substantiated. This methodology takes into account the anisotropy of the rock mass, the angle of strike of the main joint system ( $\varphi = 0^\circ\text{--}90^\circ$ ), and empirical coefficients. It ensures a safety factor of blocky benches up to 29.3 times.

The empirical modeling of PPV prediction was also improved by integrating the effect of interference from distributed charges ( $N = 3\text{--}5,35$ ), effective charge mass, and scaled distance, which provides higher accuracy compared to classical Sadovsky-type dependencies.

**The purpose of the dissertation** is to develop scientifically substantiated technological solutions for minimizing the seismic risk of mass blasting operations in granite quarries with geological disturbances, aimed at reducing the amplitude of seismic and seismoacoustic vibrations, ensuring the stability of block benches, improving the quality of crushed granite aggregate, and optimizing productivity.

**The object** of the research is the processes of mass blasting operations in granite quarries located within tectonically disturbed rock masses, including the generation, propagation, and interaction of seismic and seismoacoustic waves and their impact on the safety of dimension stone extraction.

**The subject** of the research is the technological parameters of drilling and blasting operations, the mechanisms of anisotropic wave propagation in zones of geological disturbances, the quantitative patterns of their influence on crack formation, and methods for minimizing seismic risk.

**Research methods:** analysis of scientific literature and regulatory documents; in situ seismic measurements; empirical PPV modeling considering the interference of distributed charges and rock mass anisotropy; comparative analysis of standards; mathematical statistics; and experimental verification of technological solutions.

**The scientific novelty** of the obtained results lies in the following:

- for the first time, quantitative regularities of anisotropic propagation of seismic and seismoacoustic waves in granite massifs with geological faults were established based on comprehensive in situ measurements (attenuation coefficients  $\beta =$

–1,442 along the fault versus –1,022 across the fault, with PPV amplification by 50–200 %);

- for the first time, a new methodology for determining seismically safe distances and protective pillars was proposed and substantiated, taking into account anisotropy, fracture strike angle, and empirical coefficients, ensuring a safety factor for block benches of up to 29.3;

- the empirical PPV prediction model was improved through the integration of the interference effect of distributed charges ( $N = 3-5,35$ ), effective charge mass, and scaled distance;

- a комплекс of technological solutions was developed and experimentally validated (reduction of delay intervals to 10–15 ms, orientation of the blasting front parallel to faults, square drilling pattern, and emulsion explosives with a detonation velocity of 4500–5000 m/s), enabling vibration levels to be reduced by 20–60 % without loss of fragmentation efficiency.

**The practical significance** of the dissertation results lies in the possibility of direct implementation of the developed technological solutions into blasting design documentation for operating granite quarries. This will ensure improved aggregate quality (increase in the proportion of cubiform fractions by 8–15% and an increase in the crushability grade by 100–200 units), enhanced safety of dimension stone extraction, reduced risk to nearby infrastructure and population, mitigation of social tensions, and simplification of permit acquisition procedures. The economic effect is achieved through a 5–12 % reduction in extraction costs, lower expenditures on additional protective measures, and a decrease in oversize material. The environmental effect includes reduced emissions of toxic gases, dust, noise, and anthropogenic impact on the rock mass.

The dissertation contains the results of the author's own research. The use of ideas, results, and texts of other authors is appropriately referenced.

**Keywords:** granite quarries, drilling and blasting operations, seismic vibrations, geological faults, wave anisotropy, PPV, protective pillars, technological safety, crushed granite aggregate, post-war reconstruction, tectonic disturbances.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях, які входять до наукометричних баз:*

1. Коробійчук В. В., Підвисоцький В. Т., Шамрай В. І., Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив технології відпрацювання розвалу гірської породи на розміри та форму розвалу негабариту. *Технічна інженерія*. 2022. № 2 (90). С. 147–152. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-147-152](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-147-152) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,625 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в формулюванні гіпотези щодо впливу технології відпрацювання на характеристики розвалу гірської породи, зокрема розміри та форму негабаритних шматків.

2. Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Дубінчук Д. О., Качуровський М. В. Інновації в конструкції свердловин при веденні масових вибухів. *Технічна інженерія*. 2024. № 1 (93). С. 428–434. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-428-434](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-428-434) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,25 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці ідеї щодо впровадження інновацій у конструкцію свердловин для підвищення ефективності масових вибухів, визначення ключових параметрів для аналізу.

3. Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив варіативності розмірів уламків на ефективність роботи екскаваторів у гірничих роботах. *Технічна інженерія*. 2025. № 1 (95). С. 118–123. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-118-123](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-118-123) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,375 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в підготовці ключових розділів статті, таких як вступ, методика, результати чи висновки, а також створення ілюстрацій (графіків) для демонстрації результатів.

4. Соколовський В. О., Цигода В. В. Вплив геологічних розломів на підривні роботи та сейсмічні вібрації в кар'єрах. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2025. № 2 (57). С. 84–94. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-2-84-95> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,687 друк. арк., особисто автору належить 0,35 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі впливу геологічних розломів на параметри підривних робіт, обробці даних щодо сейсмічних вібрацій та формулюванні висновків.

5. Коробійчук В. В., Бойко В. В., Ган А. Л., Соколовський В. О., Цигода В. В. Вплив сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок при супутньому видобуванні гранітів на щебінь. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. № 2 (15). С. 102–117. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-102-117> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 1,0 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в участі в постановці задачі, аналізі результатів впливу сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення та підготовці відповідних розділів статті.

6. Коробійчук В. В., Бойко В. В., Ган А. Л., Соколовський В. О., Білобров Д. М. Ефект діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль від вибуху. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2026. № 2 (17). С. 87–98. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2026-2-17-87-98> (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці методики дослідження, проведенні розрахунків впливу діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль та підготовці ілюстративного матеріалу.

*Праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.*

7. Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Качуровський М. В., Дубінчук Д. О. Ефективність вибухових робіт при підготовці щебеневої сировини. *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 62–63.

Загальний обсяг 0,125 друк. арк., особисто автору належить 0,05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі ефективності вибухових робіт, обробці експериментальних даних та формулюванні основних висновків щодо підготовки щебеневої сировини..

8. Соколовський В. О., Цигода В. В. Оптимізація параметрів підривних робіт у тектонічно порушених масивах. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 84.

Загальний обсяг 0,1 друк. арк., особисто автору належить 0,04 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці пропозицій щодо оптимізації параметрів підривних робіт, аналізі впливу тектонічних порушень та підготовці матеріалів для тез.

## **МІСТ**

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ЗМІСТ .....                                                                                                                                                | 16  |
| ВСТУП.....                                                                                                                                                 | 18  |
| РОЗДІЛ 1. МОЖЛИВОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КАР'ЄРІВ З<br>ВИРОБНИЦТВА ЩЕБЕНЮ В УКРАЇНІ .....                                                                | 25  |
| 1.1. Сучасний стан кар'єрів з видобутку щебеневої сировини в Україні .....                                                                                 | 25  |
| 1.2. Оцінка впливу вибухових робіт на якісні показники гранітного щебеню                                                                                   | 33  |
| 1.3. Вплив тектонічних розломів на ведення вибухових робіт .....                                                                                           | 40  |
| Висновки до розділу 1 .....                                                                                                                                | 44  |
| РОЗДІЛ 2. НОРМУВАННЯ ВИБУХОВИХ ВІБРАЦІЙ ТА ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ<br>СВЕРДЛОВИН НА СЕЙСМІЧНІ ХВИЛІ В ГІРНИЧИХ РОБОТАХ.....                                       | 46  |
| 2.1. Порівняльний аналіз міжнародних стандартів нормування вибухових<br>вібрацій та чинних норм України.....                                               | 46  |
| 2.2. Ефект діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль від вибуху....                                                                                  | 64  |
| Висновки до розділу 2. ....                                                                                                                                | 79  |
| РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕКТОНІЧНИХ РОЗЛОМІВ НА<br>СЕЙСМОАКУСТИЧНІ ХВИЛІ ТА СТІЙКІСТЬ БЛОЧНИХ УСТУПІВ ПРИ<br>СУПУТНЬОМУ ВИДОБУТКУ ГРАНІТІВ НА ЩЕБІНЬ ..... | 81  |
| 3.1. Вплив геологічних розломів на підривні роботи та сейсмічні вібрації в<br>кар'єрах .....                                                               | 81  |
| 3.2. Вплив сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок<br>при супутньому видобуванні гранітів на щебінь.....                                | 93  |
| Висновки до розділу 3 .....                                                                                                                                | 115 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                                                                                                                    | 117 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ..... | 119 |
| Додаток А .....                  | 129 |
| Додаток Б .....                  | 132 |
| Додаток Г .....                  | 134 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Гранітний щебінь залишається одним із базових нерудних будівельних матеріалів в Україні, що забезпечує виробництво бетону, асфальтобетону, залізобетонних конструкцій, дорожніх покриттів, фундаментів та елементів інфраструктури. Фізико-механічні властивості щебеню – міцність, морозостійкість, зерновий склад, лещадність – безпосередньо визначають довговічність і надійність споруд, роблячи стабільне та якісне виробництво цієї сировини стратегічно важливим для економіки та повоєнного відновлення країни.

До 2022 року галузь демонструвала стабільне зростання з річним обсягом видобутку близько 120 млн тонн, задовольняючи 70–80 % внутрішнього попиту та частково експорт. Основні потужності зосереджені в гранітних кар'єрах Українського щита (Житомирська, Вінницька, Київська, Кіровоградська області). Повномасштабне вторгнення Російської Федерації у 2022 році спричинило глибоку кризу: у 2023 році обсяги скоротилися приблизно на 50 % (до ~60 млн тонн), через окупацію та пошкодження частини родовищ, порушення логістики, зростання собівартості енергоносіїв і дефіцит кадрів. У 2024–2025 роках спостерігається поступове відновлення (до 70–80 млн тонн), переважно в центральних та західних регіонах, де зосереджено інтенсивне будівництво для відбудови доріг, мостів, житла та критичної інфраструктури в рамках планованих інвестицій на 2025–2030 роки понад 150 млрд дол. США. У 2026 році галузь зберігає високий потенціал зростання, однак потребує технологічної модернізації для підвищення ефективності та безпеки.

У цих умовах зростає вимога до високоякісного гранітного щебеню (кубовидної форми, низька лещадність, марка М 1400–М1600), що відповідає ДСТУ Б В.2.7-75:2001 та європейським стандартам. Буровибуховий метод залишається основним способом відбійки скельних порід, на який припадає 30–40 % собівартості видобутку. Енергія вибуху не лише руйнує масив, але й генерує зони передруйнування з мережею техногенних мікротріщин, що знижує міцність, морозостійкість і форму зерен кінцевої продукції. Це створює

фундаментальне протиріччя між необхідністю ефективного подрібнення для підвищення продуктивності екскавації та переробки й вимогою збереження природної структури каменю для товарної якості щебеню.

Особливої актуальності набуває проблема сейсмічного ризику в гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями (тектонічні розломи, зони тріщинуватості), де масові вибухи викликають анізотропне поширення сейсмічних і сейсмоакустичних хвиль. Це призводить до концентрації напружень, додаткового тріщиноутворення в блочних ділянках, ризику зниження якості блоків при супутньому видобутку гранітів на щебінь і блоки, а також потенційних загроз для прилеглих об'єктів інфраструктури та населених пунктів. Чинні українські норми нормування вибухових вібрацій (ДСТУ 4704:2008 та інші) потребують удосконалення з урахуванням міжнародних стандартів (наприклад, DIN 4150, AS 2187.2) та локальних геологічних особливостей, щоб забезпечити безпеку без суттєвого зниження продуктивності.

Таким чином, розробка технологічних рішень мінімізації сейсмічного ризику вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями є актуальною науково-практичною задачею. Вона спрямована на оптимізацію параметрів буровибухових робіт (діаметр свердловин, маса заряду, інтервали уповільнення, орієнтація фронту), визначення сейсмобезпечних відстаней і захисних ціликів, зниження амплітуди вібрацій без втрати ефективності фрагментації. Такі рішення дозволять підвищити якість щебеневої сировини, забезпечити безпеку блочних ділянок, зменшити екологічний вплив і сприяти сталому розвитку галузі в умовах повоєнного відновлення України.

**Метою роботи** є розробка науково обґрунтованих технологічних рішень з мінімізації сейсмічного ризику масових вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями, спрямовані на зниження амплітуди сейсмічних та сейсмоакустичних вібрацій, забезпечення стійкості блочних уступів при супутньому видобутку, підвищення якості гранітного щебеню та оптимізацію продуктивності без суттєвих втрат у фрагментації породи.

Для досягнення мети дисертаційної роботи було поставлено такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан видобутку гранітного щебеню в Україні, оцінити вплив повномасштабного вторгнення на галузь та визначити ключові технологічні та сейсмічні виклики в кар'єрах з геологічними порушеннями.

2. Виконати порівняльний аналіз міжнародних та українських норм регулювання вибухових вібрацій, виявити прогалини в чинному нормативному забезпеченні та обґрунтувати необхідність їх удосконалення з урахуванням локальних геологічних умов.

3. Дослідити вплив діаметра свердловин та інших параметрів заряду на генерацію пружних сейсмічних хвиль, встановити кількісні залежності між конструктивними характеристиками свердловин та рівнем сейсмічного впливу.

4. Вивчити механізми поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у тектонічно порушених гранітних масивах, визначити ступінь анізотропії та хвилеводний ефект геологічних розломів на основі натурних вимірювань.

5. Оцінити вплив сейсмоакустичних хвиль від масових вибухів на тріщиноутворення та стійкість блочних уступів при супутньому видобутку гранітів на щебінь і блоки, розрахувати допустимі рівні вібрацій та запас міцності.

6. Розробити технологічні рішення мінімізації сейсмічного ризику, зокрема оптимальні параметри буровибухових робіт (інтервали уповільнення, маса заряду на сповільнення, орієнтація підривного фронту, конструкція заряду), схеми захисних ціликів та сейсmobезпечних відстаней.

7. Запропонувати методологію сейсмічного районування кар'єрного поля з нанесенням ізолінії допустимих мас вибухових зарядів, обґрунтувати її практичну ефективність для підвищення продуктивності та безпеки ведення вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями.

*Об'єкт дослідження* – процеси масових вибухових робіт у гранітних кар'єрах, розташованих у тектонічно порушених масивах (з геологічними розломами та зонами підвищеної тріщинуватості), включаючи генерацію,

поширення та взаємодію сейсмічних і сейсмоакустичних хвиль, їх вплив на безпеку супутнього видобутку гранітів на щебінь і блоки.

*Предмет дослідження* – технологічні параметри буровибухових робіт, механізми анізотропного поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у зонах геологічних порушень, кількісні закономірності їх впливу на тріщиноутворення блочних ділянок, а також методи та технологічні рішення мінімізації сейсмічного ризику з метою забезпечення стійкості масиву та підвищення безпеки й продуктивності видобутку.

*Методи досліджень*: наліз наукової літератури та нормативів; натурні сейсмометричні вимірювання; емпіричне моделювання PPV з урахуванням інтерференції розосереджених зарядів та анізотропії масиву; порівняльний аналіз українських і міжнародних норм; експериментальна перевірка технологічних рішень; математична статистика.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

- Вперше отримано кількісні закономірності анізотропного поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у гранітних масивах з геологічними розломами на основі комплексних натурних сейсмометричних вимірювань у реальних умовах кар'єрів, зокрема встановлено коефіцієнти затухання ( $\beta = -1,442$  вздовж розлому проти  $-1,022$  поперек) та коефіцієнт посилення пікової швидкості частинок (PPV) на 50–200 % уздовж осей розломів.
- Вперше запропоновано та науково обґрунтовано нову методологію визначення сейсмобезпечних відстаней (захисних ціликів) між ділянками щебеневого та блочного видобутку з урахуванням анізотропії масиву, кута простягання основної системи тріщинуватості ( $\varphi = 0^\circ\text{--}90^\circ$ ) та емпіричних коефіцієнтів  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ , що забезпечує запас міцності блочних уступів.
- Отримало подальшого розвитку емпіричне моделювання прогнозування пікової швидкості вібрацій (PPV) у тектонічно порушених гранітних масивах шляхом інтеграції ефекту інтерференції хвиль від розосереджених зарядів ( $N = 3\text{--}5,35$ ), ефективної маси заряду  $Q_{\text{ef}}$  та

масштабованої відстані, що забезпечує вищу точність прогнозу порівняно з класичними залежностями типу Садовського.

- удосконалено та експериментально підтверджено комплекс технологічних рішень мінімізації сейсмічного впливу (зменшення інтервалів уповільнення до 10–15 мс, орієнтація фронту підризу паралельно розломам), що дозволяє знизити рівень вібрацій на 20–60 % без втрати ефективності фрагментації в умовах Ольшаницького гранітного кар'єру.

**Практичне значення отриманих результатів роботи.** В ході проведення досліджень отримано результати, що мають практичне значення:

1. Розроблені технологічні рішення мінімізації сейсмічного ризику (зменшення інтервалів уповільнення до 10–15 мс, орієнтація підризного фронту паралельно основній системі розломів, застосування емульсійних вибухових речовин зі швидкістю детонації 4500–5000 м/с, квадратна сітка свердловин з кроком 3–4 м) можуть бути впроваджені в паспортах буровибухових робіт на діючих кар'єрах. Це дозволяє знизити пікову швидкість вібрацій (PPV) на 20–60 % на відстанях 100–300 м без втрати об'єму фрагментації, що підвищує продуктивність вибухових робіт на 10–15 %, скорочує витрати на додаткові заходи захисту (наприклад, захисні екрани, моніторинг) та зменшує кількість негабаритів.

2. Запропонована методологія розрахунку сейсмобезпечних відстаней і захисних ціликів ( $r_{c1} = 20,34$  м уздовж тріщин,  $r_{c2} = 25,77$  м поперек) з урахуванням анізотропії масиву та кута простягання тріщинуватості забезпечує безпечне супутнє ведення робіт на ділянках щебеневого та блочного видобутку. Це дозволяє уникнути утворення мікротріщин у блочних уступах, зберегти якість блочного каменю (марка M1200–M1400 без зниження) та запобігти втратам сировини, що особливо актуально для кар'єрів з паралельним видобутком.

3. Розроблена карта сейсмічного районування кар'єрного поля з ізолініями допустимих максимальних мас зарядів на одне сповільнення може бути інтегрована в плани гірничих робіт та системи оперативного управління

вибухами. Її впровадження сприяє підвищенню безпеки для прилеглих об'єктів інфраструктури та населених пунктів (зниження PPV до значень нижче 2 мм/с за DIN 4150), зменшенню соціальної напруги (скарги громадськості), а також спрощенню проходження екологічної експертизи та отримання дозволів на вибухові роботи.

4. Запропоновані рішення мають економічний ефект за рахунок зниження собівартості видобутку (економія 5–12 % на ВР та бурових роботах завдяки оптимізованим параметрам), що підтверджується актом впровадження результатів дисертаційної роботи в ТОВ «Західукрвибухпром».

Обґрунтованість та вірогідність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується обсягом проведених натурних спостережень, використанням методів математичної статистики та обробки результатів вимірювань, відповідністю окремим результатам досліджень інших авторів, застосуванням обґрунтованих математичних моделей.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є закінченою, самостійно виконаною науковою працею. Наукові розробки, висновки, рекомендації, положення, які подано у дисертаційній роботі, є результатом самостійно проведеного наукового дослідження. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які представлені до захисту, одержані автором особисто (звіт подібності сформований за допомогою програми StrikePlagiarism (додаток Г).

Основні положення дисертаційної роботи та окремі її результати обговорювалися на науково-технічній конференції семінарах та нарадах, а саме на: II Всеукраїнської науково-практичної конференції Сучасні проблеми гірництва та будівництва (Житомир, Україна, 2024 р.), III Всеукраїнської науково-практичної конференції Сучасні проблеми гірництва та будівництва (Житомир, Україна, 2025 р.).

*Публікації.* Основні положення наукових розробок, отриманих здобувачем, опубліковано у 8 наукових працях загальним обсягом 4,34 друк. арк. (авторський обсяг – 1,65 друк. арк.), із них 6 статей у наукових фахових виданнях загальним обсягом 4,09 друк. арк. (авторський обсяг – 1,4 друк. арк.); 2 публікації у

матеріалах і тезах конференцій загальним обсягом 0,25 друк. арк. (авторський обсяг – 0,09 друк. арк.) (додаток А).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів і висновку, викладених на 118 сторінках основного тексту, містить 28 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 98 найменувань на 10 сторінках і 3 додатки на 7 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1. МОЖЛИВОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КАР'ЄРІВ З ВИРОБНИЦТВА ЩЕБЕНЮ В УКРАЇНІ**

### **1.1. Сучасний стан кар'єрів з видобутку щебеневої сировини в Україні**

Щебенева сировина, насамперед гранітний та вапняковий щебінь, є базовим компонентом більшості будівельних технологій та матеріалів. Її застосування охоплює широкий спектр галузей: від виготовлення бетону й асфальтобетонних сумішей до виробництва залізобетонних конструкцій, облаштування транспортної інфраструктури, зведення інженерних споруд та житлових об'єктів. Саме фізико-механічні властивості щебеню визначають довговічність, міцність і експлуатаційну надійність дорожніх покриттів, фундаментів та елементів об'єктів капітального будівництва, що зумовлює високу потребу у стабільному та якісному видобутку цієї сировини.

В Україні функціонує значна кількість кар'єрів із видобутку щебеневої сировини, що забезпечують роботу дорожньо-будівельних, бетонних, залізобетонних та інфраструктурних підприємств. Географія розміщення таких кар'єрів пов'язана з поширенням корисних копалин кристалічного та осадового походження. Основні запаси гранітів сконцентровані в межах Українського щита, що охоплює Київську, Житомирську, Вінницьку, Дніпропетровську та Кіровоградську області. На цих територіях діє понад сорок великих і середніх гранітних кар'єрів, які забезпечують видобуток щебеню високої міцності, що особливо цінується у дорожньому будівництві та бетонних конструкціях [1].

Поряд із цим, значні родовища вапнякової сировини зосереджені у західних і південних регіонах України, зокрема у Львівській, Тернопільській, Хмельницькій, Одеській та Миколаївській областях. Вапняковий щебінь, хоча й поступається гранітному за міцністю, широко використовується у виробництві цементу, як заповнювач у легких бетонних сумішах, у дорожньому будівництві місцевого значення, а також як регулятор кислотності у промислових технологічних процесах. Така різноманітність родовищ забезпечує Україні можливість формувати збалансований ринок щебеневої продукції з різними характеристиками та властивостями.

У докризовий період щебенева промисловість України стабільно покривала 70–80 % потреб внутрішнього ринку, що свідчило про її високий промисловий потенціал та ресурсну забезпеченість. Продукція значної частини кар'єрів також була орієнтована на експорт, зокрема до країн Європейського Союзу, де український щебінь цінувався за якість та конкурентну собівартість.

Однак повномасштабне вторгнення Російської Федерації у 2022 році спричинило глибокі структурні зміни в галузі. Частина підприємств опинилася на тимчасово окупованих територіях або в зоні активних бойових дій, що призвело до їх повної або часткової зупинки. Порушення логістичних ланцюгів, руйнування транспортної інфраструктури та зміщення будівельних пріоритетів також негативно вплинули на стабільність поставок щебеневої продукції. Попит на матеріал став нерівномірним: зменшилися обсяги цивільного будівництва, водночас зросла потреба у щебені для відновлення доріг, мостів та критично важливих інфраструктурних об'єктів.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну 24 лютого 2022 року мало катастрофічний вплив на гірничо-видобувну галузь, зокрема на кар'єри з видобутку щебеневої сировини (гранітного та вапнякового щебеню). Ця галузь, яка до війни забезпечувала стабільне виробництво близько 120 млн тонн щебеню на рік [2], стала однією з найвразливіших через близькість родовищ до зон бойових дій, логістичні перебої та системні ризики. За оцінками аналітиків, війна призвела до скорочення видобутку на 50 % у 2023 році (до 60 млн тонн), з частковим відновленням до 70–80 млн тонн у 2024–2025 роках [1–8]. Нижче детально розглянуто ключові аспекти впливу, з акцентом на економічні, операційні, екологічні та соціальні наслідки.

#### *Економічний та виробничий вплив*

Війна спричинила різке падіння виробництва через окупацію, обстріли та мінування родовищ. За даними Impulse Consulting, у 2022 році обсяги видобутку скоротилися на 20 % порівняно з 2021 роком, а у 2023-му – ще на 20 % [4]. Основні причини:

- окупація та пошкодження інфраструктури: Близько 20–25% кар'єрів на сході та півдні (Донецька, Луганська, Запорізька, Херсонська області) опинилися під окупацією або в зоні ризику. Наприклад, родовища в Донбаському регіоні, багаті на гранітні масиви, стали недоступними, що призвело до втрат запасів на мільярди гривень [5, 9]. Обстріли пошкодили обладнання: дробарки, конвеєри та залізничні гілки, необхідні для транспортування;

- зростання собівартості: Ціни на енергоносії зросли на 30–50 %, а дефіцит пального та запчастин – через санкції та блокаду портів – підвищив витрати на 25–35 % [3]. У 2022–2023 роках імпорт щебеню зріс на 40 % (до 30 млн тонн), переважно з Польщі, Румунії та Туреччини, що компенсувало дефіцит, але збільшило залежність від зовнішніх постачальників [2, 4];

- експортні втрати: до війни експорт по Чорному морю та Дунаю становив 15–20 % виробництва, але блокада портів Одеси та Миколаєва скоротила його на 70 % у 2022 році. Лише у 2023–2024 роках, завдяки коридору по Дунаю, експорт відновився до 10 млн тонн [2, 4].

Незважаючи на зазначені труднощі, галузь зберігає стратегічне значення для економіки держави та відіграє ключову роль у процесах відновлення і модернізації країни. Видобуток щебеневої сировини розглядається як один із базових секторів, необхідних для реалізації проєктів повоєнної реконструкції, розвитку транспортної інфраструктури та житлового будівництва. Тому подальша адаптація підприємств, оновлення технічного парку, розширення безпечних виробничих потужностей та оптимізація логістики є важливими напрямками забезпечення стабільної роботи щебених кар'єрів в Україні.

До 2021 року виробництво щебеню в Україні стабільно зростало, досягаючи 120 млн тонн на рік, здебільшого завдяки попиту на дорожнє будівництво в рамках програми "Велике будівництво". Однак війна призвела до різкого скорочення обсягів: у 2023 році видобуток склав лише 60 млн тонн, що на 50 % менше, ніж у 2022 році [1–5]. Прогнози на 2024–2025 роки вказують на можливе відновлення до 70–80 млн тонн, за умови стабілізації фронту та інвестицій у модернізацію. Основні виробники, такі як ТОВ "Гніванський

гранітний кар'єр" (Вінницька обл.), ТОВ "ВО Богуславський граніт" (Київська обл.) та філії "Укрзалізниці" (наприклад, Девладівський кар'єр у Кіровоградській обл.), зосереджені на фракціях 5–20 мм, 20–40 мм та відсипу 0–5 мм, які відповідають ДСТУ Б.В.2.7-75:2001 [8].

Кар'єри Укрзалізниці, що є одним з найбільших гравців, у 2021–2022 роках виробили 5,8 млн тонн щебеневої продукції, але планують подвоїти обсяги у 2025 році для потреб відбудови [8]. У 2025 році "Укрзалізниця" відновлює продаж щебеню на аукціонах ProZorro після дворічної паузи, спричиненої війною. Загальна ємність ринку щебеню у 2025 році оцінюється в 75 млн тонн, з часткою гранітного щебеню понад 60 % [1, 5].

Аналіз обсягів видобутку гірничої маси щебеновими кар'єрами в Україні за період 2021–2024 років засвідчує глибоку кризу галузі, спричинену повномасштабним вторгненням 2022 року, та подальшу значну регіональну диференціацію в процесах відновлення. Видобуток у 2022 році зазнав обвального падіння у всіх регіонах, що особливо відчутно позначилося на прифронтових областях. Подальша динаміка 2023–2024 років демонструє, що відновлення концентрується переважно у центральних та західних регіонах, тоді як прифронтові області продовжують демонструвати стагнацію або погіршення показників.

Вихідним референсним періодом є 2021 рік, коли видобувна галузь функціонувала на довоєнному рівні. Лідером за обсягами видобутку була Житомирська область з показником 9153 тис. куб. м, значно випереджаючи Рівненську (4261 тис. куб. м) та Київську (3771 тис. куб. м) області.

Повномасштабне вторгнення спровокувало катастрофічне падіння у 2022 році, що стало універсальною тенденцією для всіх регіонів. Обсяги видобутку в Житомирській області впали на 80 % до 1831 тис. куб. м. Проте, найбільш критичне відносне падіння продемонстрували прифронтові регіони: Запорізька область знизила видобуток на 86,5 % (до 406 тис. куб. м), а Дніпропетровська область – на 78,5 % (до 274 тис. куб. м). Це падіння відображає руйнування логістичних ланцюгів та безпосередні безпекові ризики.

Таблиця 1.1

Обсяги видобутку гірничої маси щебеневими кар'єрами по роках

| Область України  | Всього гірничої маси, тис. куб. м |      |      |      |
|------------------|-----------------------------------|------|------|------|
|                  | 2021                              | 2022 | 2023 | 2024 |
| Житомирська      | 9153                              | 1831 | 2517 | 2031 |
| Рівненська       | 4261                              | 1791 | 2763 | 2305 |
| Київська         | 3771                              | 1202 | 1903 | 2305 |
| Полтавська       | 3267                              | 841  | 1283 | 1047 |
| Вінницька        | 3238                              | 1016 | 1850 | 1349 |
| Запорізька       | 2992                              | 406  | 402  | 399  |
| Кіровоградська   | 2208                              | 457  | 742  | 419  |
| Хмельницька      | 1790                              | 615  | 1001 | 1004 |
| Миколаївська     | 1426                              | 546  | 765  | 1035 |
| Дніпропетровська | 1274                              | 274  | 343  | 205  |
| Черкаська        | 594                               | 180  | 379  | 283  |
| Одеська          | 0                                 | 0    | 0    | 13   |

Період 2023–2024 років характеризується нерівномірною динамікою відновлення. Тенденції чітко розділяються на дві групи:

1. Регіони зі Швидким Відновленням (Центральна та Західна Україна): Ці області демонструють активне зростання обсягів, що пов'язано з інтенсивним відновленням інфраструктури та будівництвом житла. Київська область є лідером за відносною швидкістю відновлення: обсяг 2024 року (2305 тис. куб. м) зріс майже на 92 % порівняно з 2022 роком, досягнувши показників Рівненської області (2305 тис. куб. м). Рівненська область також демонструє стабільне відновлення (+28,7 % з 2022 по 2024). Натомість, відновлення Житомирської

області є помірним (+10,9 % з 2022 по 2024), що дозволило Київській та Рівненській областям майже наздогнати її за поточними обсягами.

2. Регіони Стагнації (Прифронтові Області): у цих областях позитивна динаміка відновлення відсутня. Запорізька область демонструє фактичну стагнацію обсягів видобутку на мінімальному рівні близько 400 тис. куб. м протягом 2022–2024 років. Дніпропетровська область навіть показує негативну тенденцію, де обсяг 2024 року (205 тис. куб. м) виявився нижчим за кризовий 2022 рік, що підкреслює критичний вплив триваючих бойових дій та обстрілів на виробничу діяльність.

Таким чином, видобувна галузь щебеневих кар'єрів у період 2021–2024 років пройшла фазу кризового шоку (2022) і перейшла до фази асиметричного відновлення. Житомирська, Рівненська та Київська області консолідували своє лідерство як основні постачальники будівельних матеріалів для відновлення, тоді як Запорізька та Дніпропетровська області відображають найбільші структурні та безпекові проблеми галузі.

Найдешевший щебінь – безпосередньо на кар'єрах Житомирської, Вінницької, Рівненської, Запорізької, Дніпропетровської та Кіровоградської областей. Тут ціна фракції 5–20 мм коливається в межах 450–560 грн/т (франко-кар'єр). Відсів 0–5 мм – найдешевші (390–480 грн/т), бут 40–70 мм – 400–500 грн/т.

У Київській області ціни вищі на 100–200 грн/т через величезний попит і логістику: середня ціна 5–20 мм – 580–680 грн/т з доставкою по Києву та області.

На заході України (Львівська, Івано-Франківська, Волинська, Закарпаття) щебінь коштує 620–780 грн/т за 5–20 мм, бо власні кар'єри невеликі, а основна маса везеться з Рівного чи Житомира.

## Обсяги втрат гірничої маси щебеновими кар'єрами по роках

| Область України  | Втрати гірничої маси, тис. куб. м |      |      |      |
|------------------|-----------------------------------|------|------|------|
|                  | 2021                              | 2022 | 2023 | 2024 |
| Житомирська      | 22                                | 3,7  | 4,53 | 3,77 |
| Рівненська       | 12                                | 4,8  | 6,77 | 2,35 |
| Київська         | 8                                 | 1,9  | 2,76 | 3,68 |
| Полтавська       | 26                                | 8,6  | 7,84 | 6,05 |
| Вінницька        | 0                                 | 0    | 0,22 | 0,22 |
| Запорізька       | 9                                 | 0,1  | 0,9  | 1,29 |
| Кіровоградська   | 11                                | 2,8  | 4,53 | 1,91 |
| Хмельницька      | 0                                 | 0,3  | 1,09 | 0,86 |
| Миколаївська     | 4                                 | 3,3  | 3,51 | 3,87 |
| Дніпропетровська | 7                                 | 0,89 | 1,32 | 1,08 |
| Черкаська        | 2                                 | 0,4  | 0,84 | 0,78 |
| Одеська          | 0                                 | 0    | 0    | 0,05 |

На півдні та сході (Одеська, Миколаївська, Харківська, Сумська, Полтавська області) ціни найвищі – 680–850 грн/т за ту саму фракцію 5–20 мм, бо відстань від кар'єрів 400–700 км, а доставка залізницею або фурами додає 300–500 грн/т.

Середня ціна по всій Україні у вересні 2025 (табл. 1.3): фракція 5–20 мм: 520–620 грн/т (на кар'єрі), 750–980 грн/т (з доставкою до об'єкта), фракція 20–40 мм: на 50–80 грн/т дешевше, відсів 0–5 мм: на 80–120 грн/т дешевше. Кубовидний щебінь марки М1400 та лещадність  $\leq 10\%$ : +70–120 грн/т до базової ціни.

Вересень – пік будівельного сезону, тому ціни на 7–12 % вищі, ніж у грудні–лютому. З жовтня–листопада традиційно починається зниження на 5–8 %.

Таблиця 1.3

Вартість щебеневої щебеню по регіонах України станом  
на вересень 2025 рік, грн/т

| Область України                                            | Фракція<br>5–10 / 5–20<br>мм | Фракція<br>20–40 мм | Фракція<br>0–70 мм |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Житомирська, Вінницька,<br>Рівненська (ближче до кар’єрів) | 480–550                      | 420–500             | 400–470            |
| Київ та Київська область                                   | 520–650                      | 470–580             | 450–550            |
| Львівська, Івано-Франківська,<br>Чернівецька               | 500–620                      | 450–560             | 430–520            |
| Запорізька, Дніпропетровська,<br>Кіровоградська            | 450–540                      | 400–500             | 380–470            |
| Одеська, Миколаївська                                      | 550–680                      | 500–620             | 480–580            |
| Харківська, Полтавська                                     | 580–720                      | 520–650             | 500–600            |
| Захід (Закарпаття, Волинь)                                 | 580–750                      | 550–680             | 520–650            |

Попри виклики, галузь має потенціал зростання завдяки відбудові інфраструктури (план на 2025-2030 рр. – 150 млрд дол. інвестицій). У 2025 році очікується зростання експорту по Дунаю до 10 млн тонн [10]. Держава стимулює галузь через спрощення ліцензування та ЄС-фонди для "зеленої" рекультивації [11, 12]. Модернізація (бурові станки Atlas Copco, екскаватори Volvo) на ключових кар’єрах дозволить підвищити ефективність на 20–30 % [1-9]. Загалом, за оптимістичним сценарієм, виробництво може досягти довоєнних рівнів до 2027 року, сприяючи ВВП на 1–2 % [13].

## **1.2. Оцінка впливу вибухових робіт на якісні показники гранітного щебеню**

Сучасна будівельна індустрія висуває жорсткі вимоги до якості нерудних будівельних матеріалів, зокрема гранітного щебеню, який є основним заповнювачем для високоміцних бетонів та дорожніх покриттів. Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-75, ключовими показниками якості є міцність, морозостійкість, зерновий склад та форма зерен (лещадність) [14]. Однак, у виробничому циклі гірничодобувних підприємств існує фундаментальне протиріччя: необхідність ефективного руйнування масиву гірських порід для подальшої переробки та вимога збереження природної цілісності структури каменю в окремому шматку щебеню.

Основним способом відбійки скельних порід залишається буровибуховий метод, на частку якого припадає до 30–40 % собівартості видобутку. При цьому, енергія вибуху витрачається не лише на відокремлення та подрібнення породи, але й призводить до виникнення зони передруйнування в глибині масиву, формуючи систему мікротріщин, які суттєво знижують експлуатаційні характеристики кінцевої продукції [15]. Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки науково обґрунтованих параметрів БВР, які б забезпечували баланс між якістю дроблення гірничої маси та збереженням фізико-механічних властивостей щебеню.

Реальна міцність крихких матеріалів (в тому числі гранітів) у сотні й тисячі разів нижча за теоретичну міцність ідеальної кристалічної решітки через наявність мікродефекту – тріщин, що виступають концентраторами напружень. Цю фундаментальну закономірність вперше пояснив А. А. Гріффітс у 1921–1924 рр. [16, 17].

Основні положення теорії Гріффітса:

- руйнування відбувається, коли вивільнена пружна енергія при подовженні тріщини перевищує енергію, необхідну для утворення нової поверхні;

- критерій стійкості тріщини в одноосьовому розтягу для еліптичної тріщини довжиною  $2c$ :

$$\sigma\sqrt{\pi c} = \sqrt{2E\gamma/\pi} = \text{const},$$

де  $\sigma$  – напруження розтягу,  $E$  – модуль Юнга,  $\gamma$  – питома поверхнева енергія [17];

У подальших модифікаціях (Irwin, Orowan)  $\gamma$  замінено на критичне вивільнення енергії  $G_c$ , що враховує також пластичну роботу [19].

У процесі вибуху в гранітному масиві:

- ударна хвиля створює короточасні напруження стиску, що перевищують динамічну міцність породи;
- при відбитті від вільної поверхні виникають розтягуючі напруження, що відкривають і подовжують наявні мікротріщини саме за механізмом Гріффітса [20, 21];
- гази детонації, проникаючи в розкриті тріщини, створюють додатковий клиноподібний ефект.

Сучасні динамічні моделі (модель Grady–Kipp, 1980; Thorne, 1990; модель RFPA з урахуванням швидкості навантаження) показали, що при швидкостях деформування  $>10^3 \text{ с}^{-1}$  (типово для вибуху) критична довжина тріщини Гріффітса зменшується в десятки разів, що пояснює масове утворення нових техногенних мікротріщин на відстані до 50–80 діаметрів заряду [22, 23, 24].

техніка smooth blasting розроблена У. Лангефорсом та Б. Чільстромом у 1950–60-х рр. [25]. Типові параметри для гранітних кар'єрів:

- діаметр контурних свердловин 38–64 мм;
- відстань між свердловинами 12–18 d;
- лінійна густина заряду 0,15–0,35 кг/м (декапловані заряди типу Gurit, Decadex);
- контурний ряд підривається останнім з уповільненням 300–600 мс [25, 26].

Результат: перевищення стінки уступу  $<0,3 \text{ м}$ , зниження густини мікротріщин на 40–65 % [27].

США та Канада. Широко застосовують presplitting та cushion blasting. Presplitting створює захисну щілину до вибуху основної маси (лінійна густина  $0,1-0,2$  кг/м), cushion blasting – контурний ряд підривається останнім з буферним рядом [28, 29]. Дослідження US Bureau of Mines та NIOSH (1980–2000) показали зниження лещадності на 10–18 % і підвищення марки щебеню на 100–300 одиниць [30].

Австралія. Найбільший у світі досвід wall control blasting (BHP, Rio Tinto, Orica). Стандарт AS 2187.2-2006 та рекомендації Large Open Pit Project чітко регламентують параметри smooth blasting. Використання електронних детонаторів i-Kon III та SmartShot забезпечує точність  $\pm 0,1$  мс. На гранітних кар'єрах Queensland та Boral досягнуто зменшення лещадності фракції 5–20 мм з 22–28 % до 8–12 %, зростання виходу кубовидної фракції на 15–20 % [31, 32, 33].

Порівняльна характеристика промислових вибухових речовин та їх вплив на якість щебеню й екологію

| Тип ВР                                       | Швидкість детонації, км/с | Енергія, МДж/кг | Токсичні гази, л/кг | Вплив на мікротріщину ватість | Екологічна оцінка |
|----------------------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|
| Амоніт 6ЖВ, АС-ДТ                            | 3,8–4,5                   | 3,8–4,1         | 60–90               | Найвищий                      | Найгірша          |
| Граммоніт 79/21                              | 4,0–4,9                   | 4,0–4,3         | 40–70               | Високий                       | Погана            |
| ANFO                                         | 3,0–5,5                   | 3,6–3,9         | 20–50               | Середньо-високий              | Середня           |
| Емульсійні ВР (Emulex, Titan 9000, Powergel) | 4,8–6,5                   | 4,2–4,9         | 5–15                | Найнижчий                     | Найкраща          |

Троїловмісні ВР створюють вищу пікову швидкість частинок PPV та інтенсивніші розтягуючі напруження → посилене розкриття мікротріщин за Гріффітсом → зниження марки щебеню на 100–300 одиниць і морозостійкості на 25–50 циклів [34, 35].

Емульсійні ВР мають більш «плавну» детонацію, кращий розподіл енергії між хвилею та газами, що дозволяє зменшити питому витрату ВР на 10–18 % при збереженні або підвищенні якості дроблення [36, 37]. Перехід українських гранітних кар'єрів (Жежелівський, Капулівський, Глушковицький ГЗК) на 100 % емульсійні ВР у 2018–2024 рр. дав:

- зниження лещадності фракції 5–20 мм на 5–11 %;
- підвищення марки за дробимістю з М1200 до М1400–М1600;
- скорочення викидів CO та NOx на 65–85 % [38, 39].

При детонації свердловинного заряду в гірському масиві виникає поле напружень, яке можна умовно розділити на кілька зон: зону зминання (порожина вибуху), зону радіальних тріщин та зону пружних деформацій. В зоні, безпосередньо прилеглої до заряду, тиск продуктів детонації досягає значень, що у десятки разів перевищують межу міцності граніту на стиск. Це призводить до інтенсивного подрібнення породи в "пил" або дрібну фракцію, структура якої повністю зруйнована. Ця частина масиву, хоч і незначна за обсягом, є джерелом найбільших втрат корисної копалини у відсів. Більш важливим для якості товарного щебеню є процеси в зоні радіальних тріщин. Під дією тангенціальних напружень розтягу, що виникають при проходженні хвилі стиснення, відбувається розкриття природних тріщин та утворення нових – техногенних. Дослідження шліфів зразків, відібраних з цієї зони, показують [24], що мікротріщини розвиваються переважно по межах зерен мінералів (польового шпату, кварцу, біотиту), послаблюючи міжзернові зв'язки. Інтенсивність тріщиноутворення ( $K_{cr}$ ) прямо пропорційна амплітуді хвилі напружень ( $P$ ) та обернено пропорційна акустичній жорсткості породи ( $\rho C$ ):

$$K_{cr} = f\left(\frac{P}{\rho C \sigma_{tens}}\right)$$

$\sigma_{tens}$  – межа міцності породи на розтяг.

Надмірна питома витрата вибухової речовини (ВР) призводить до того, що радіус зони інтенсивного тріщиноутворення перекидає розрахункову лінію найменшого опору (ЛНО), внаслідок чого значний обсяг відбитої породи отримує приховані дефекти ще до стадії механічного дроблення.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити кількісну залежність між питомою витратою ВР та зниженням міцності щебеню. При збільшенні питомої витрати з 0,5 до 0,65 кг/м<sup>3</sup> спостерігалось зниження середньої марки щебеню за дробимістю. Якщо при  $q = 0,5$  кг/м<sup>3</sup> вихід щебеню марки М 1400 складав 85 %, то при  $q = 0,65$  кг/м<sup>3</sup> цей показник знижувався

до 68 %, а частка марки М 1200 зростала. Це пояснюється тим, що "перезаряджання" свердловин генерує ударну хвилю надлишкової потужності. Енергія, яка не була витрачена на утворення магістральних тріщин (відділення блоку), дисипує в масиві, утворюючи мережу мікротріщин розміром 0,01–0,1 мм. *Вплив на морозостійкість.* Морозостійкість граніту безпосередньо корелює з його водопоглинанням. Техногенні мікротріщини суттєво збільшують капілярну пористість матеріалу. Аналіз зразків показав, що щебінь, отриманий при "м'якому" підриванні (використання ВР зі зниженою швидкістю детонації або розосереджених зарядів), витримує на 50–100 циклів заморожування-відтавання більше, ніж зразки з блоків, підірваних концентрованими зарядами високобризантних ВР (наприклад, емульсійних ВР без керування енергією). Згідно з даними [25], коефіцієнт розм'якшення порід, що зазнали інтенсивного вибухового впливу, знижується з 0,95 до 0,82.

Одним із найбільш регульованих параметрів якості є форма зерна (лещадність). Встановлено, що лещадність залежить не лише від типу дробарки (щоківу, конусну чи ударну), але й від характеру первинного руйнування масиву.

При миттєвому або короткоуповільненому підриванні з малими інтервалами, взаємодія хвиль напружень може призводити до формування зон концентрації напружень, де порода розколюється на пластинчасті уламки. Це особливо характерно для гранітів з вираженою анізотропією або шаруватістю.

Застосування збільшених інтервалів уповільнення (понад 40 мс між свердловинами в ряду та 60–80 мс між рядами) дозволяє забезпечити умови, за яких кожна свердловина працює на додаткову вільну поверхню, утворену попереднім вибухом. Це сприяє більш рівномірному розподілу енергії та формуванню уламків ізометричної (кубовидної) форми. Експерименти показали, що перехід від діагональної схеми комутації до широких клинових схем із поскважинним уповільненням дозволив знизити вихід лещадних зерен у фракції 20–40 мм на 4–6 % ще на етапі гірничої маси [26].

На основі аналізу отриманих результатів, для мінімізації негативного впливу вибухових робіт на якість щебеню пропонується комплекс заходів:

1. Застосування розосереджених зарядів. Введення повітряних або інертних проміжків у стовп заряду дозволяє знизити піковий тиск детонації на стінки свердловини, розтягнути імпульс вибуху у часі та збільшити частку енергії, що йде на газодинамічне розширення тріщин, а не на ударне дроблення. Це зменшує зону мікротріщинуватості навколо заряду.

2. Використання емульсійних вибухових речовин (ЕВР) з регульованою густиною. Можливість змінювати густину ЕВР по висоті колонки заряду дозволяє адаптувати енергію вибуху до міцнісних характеристик різних шарів масиву.

3. Перехід на електронні системи ініціювання. Точність електронних детонаторів (відхилення менше 0,1 %) дозволяє реалізувати складні схеми інтерференції хвиль, забезпечуючи оптимальне подрібнення без надмірного руйнування внутрішньої структури каменю.

4. Коригування питомої витрати ВР. Рекомендується перехід від емпіричного призначення  $q$  до розрахункового, що базується на оперативній оцінці блочності масиву перед вибухом (фотопланіметрія забою). Зниження  $q$  на 10–15 % в зонах з інтенсивною природною тріщинуватістю дозволяє зберегти міцність щебеню.

Покращення якісних показників щебеню має прямий економічний ефект. Збільшення виходу кубовидного щебеню 1-ї групи (лещадність до 10 %) дозволяє реалізовувати продукцію за вищими цінами. Збереження високої марки міцності (М 1400) розширює ринок збуту, дозволяючи використовувати щебінь у відповідальних конструкціях (мостобудування, злітні смуги аеропортів). Розрахунки показують, що, незважаючи на деяке зростання витрат на буріння (при зменшенні сітки свердловин) та більш дорогі засоби ініціювання, загальна рентабельність виробництва зростає за рахунок підвищення класності готової продукції та зменшення виходу відсіву.

### **1.3. Вплив тектонічних розломів на ведення вибухових робіт**

Ефективне та безпечне ведення гірничих робіт, особливо на кар'єрах, які розробляють родовища Українського кристалічного щита, нерозривно пов'язане з якісною підготовкою масиву до виймання. Ключовим етапом цієї підготовки є буровибухові роботи. Однак гірничо-геологічні умови родовищ скельних порід часто ускладнені наявністю тектонічних розломів, зон мілонітизації та підвищеної тріщинуватості [40].

Ці диз'юнктивні дислокації є природними неоднорідностями, які суттєво змінюють фізико-механічні властивості гірського масиву: знижують міцність, збільшують водопроникність і, найголовніше, створюють анізотропію в поширенні енергії вибуху [41]. Ігнорування впливу тектонічних розломів на етапі проектування БВР призводить до:

1. Технологічних ускладнень: вихід великогабаритних блоків (негабариту) у зоні сталого масиву та надмірне перевиподрібнення (виходу відсіву) у зоні розлому.
2. Економічних втрат: додаткові витрати на вторинне дроблення негабариту та зниження виходу товарних фракцій.
3. Загрози безпеці: неконтрольований розліт шматків та підвищена сейсмічна дія вибуху [42].

Актуальність роботи полягає в необхідності розробки адаптивних методик проектування БВР, які дозволяють максимально нівелювати негативний вплив тектонічних структур на ефективність видобутку та дотримання екологічних норм.

Тектонічні розломи – це зони інтенсивно порушеної породи, які можуть бути заповнені пухким матеріалом (глинки, мілоніти) або бути представлені зоною дзеркал ковзання. З точки зору фізики вибуху, така зона є акустичною межею розділу [43].

При поширенні ударної хвилі, що генерується зарядом вибухової речовини, і зустрічі її з тектонічним розломом, виникають такі явища:

Відбивання хвилі: частина енергії хвилі напружень відбивається від межі

розлому. Це призводить до утворення хвиль розтягу, що сприяє руйнуванню масиву перед розломом.

Заломлення та поглинання (дисипація): значна частина енергії поглинається зоною мілонітизації або пухким заповнювачем. Це зменшує ефективну енергію, що передається на подальший масив, і вимагає коригування питомої витрати ВР.

Ефект «вільної поверхні»: розлом може діяти як додаткова вільна поверхня, до якої спрямовуються основні тріщини, що ініціюються вибухом. Це є позитивним фактором, якщо розлом розташований паралельно до фронту забою.

Коли вибухова свердловина розташована поблизу або паралельно до тектонічного розлому (особливо на відстані, меншій ніж розрахункова лінія найменшого опору  $W$ ).

Надмірне дроблення та сейсміка: якщо заряд розташований у міцній породі, а розлом близько, енергія вибуху "проривається" по шляху найменшого опору (зоні розлому). Це призводить до інтенсивного перевиподрібнення в зоні розлому, підвищеного розльоту шматків та значного зростання сейсмічної дії, оскільки енергія поширюється у вигляді поверхневих хвиль [44]. Вихід негабариту: якщо розлом розташований перпендикулярно до фронту забою і є кінцевою межею блоку, то через дисипацію енергії в його пухкій зоні руйнування біля самого розлому є недостатнім. Це залишає великі блоки невідбитої породи (негабарит) між останнім свердловинним зарядом та розломом. Асиметричне руйнування: розлом робить масив анізотропним. Розрахункова ЛНО ( $W$ ) стає невірною, оскільки опір породи в напрямку розлому (де порода вже порушена) значно менший, ніж у напрямку монолітного масиву [45].

Для ефективного коригування параметрів БВР необхідне попереднє інженерно-геологічне моделювання.

#### *Геофізична розвідка та моделювання*

Сучасна практика вимагає комплексного підходу до виявлення тектонічних порушень, який включає: візуальне картування – деталізація

геологічних карт уступу з фіксацією дзеркал ковзання, брекчій та зон гідротермальної зміни. Сейсмоакустичні методи: метод відбитої та заломленої хвилі дозволяє визначити глибину залягання, кут падіння та потужність зон низької швидкості сейсмічних хвиль, які корелюють із зонами розломів [46]. Зниження швидкості поширення хвилі ( $C_p$ ) у 1,5–2 рази вказує на сильне порушення структури (мілонітизацію). Буріння розвідувальних свердловин: кернове буріння через зону передбачуваного розлому дозволяє отримати фізичний зразок для лабораторного визначення коефіцієнта тріщинуватості ( $K_{tr}$ ), зниження міцності та вмісту глинистих матеріалів.

#### *Кількісна оцінка впливу*

Вплив розлому на параметри БВР може бути оцінений через коефіцієнт зниження міцності ( $K_m$ ) та коефіцієнт тріщинуватості ( $K_{tr}$ ), які безпосередньо використовуються для коригування питомої витрати ВР [47].

Коефіцієнт тріщинуватості ( $K_{tr}$ ):

$$K_{tr} = 1 + \frac{N_{tr}L_{sv}}{L_{total}},$$

де  $N_{tr}$  – кількість тріщин на одиницю довжини керна у зоні розлому,  $L_{sv}$  – довжина зони впливу розлому,  $L_{total}$  – загальна довжина уступу. Збільшення  $K_{tr}$  вказує на необхідність зниження питомої витрати ВР.

Зона ефективної дії розлому. Експериментально доведено, що розлом впливає на якість дроблення на відстані  $2W$  від своєї межі [48], де  $W$  – розрахункова ЛНО для монолітного масиву. Розрахунки паспортів БВР мають враховувати це вікно впливу.

Для нівелювання негативного впливу розломів необхідно перейти від уніфікованого паспорта БВР до адаптивного (зонального) проектування.

#### *Коригування питомої витрати та конструкції заряду*

Зниження питомої витрати ВР ( $q$ ): у зоні, безпосередньо прилеглий до розлому (зона мілонітизації), міцність породи значно знижена. Необхідно знижувати  $q$  на 20–35 % відносно штатного значення для моноліту, щоб

уникнути надмірного дроблення, яке призводить до великого виходу відсіву, та зменшити сейсмічний вплив.

$$q_{\text{роз}} = q_{\text{штат}}(1 - \Delta q),$$

$\Delta q$  – коефіцієнт зниження, що залежить від потужності зони розлому та коефіцієнта тріщинуватості.

Використання розосереджених зарядів – застосування повітряних або інертних проміжків (забійки) у стовпі заряду, розташованих навпроти зони максимального порушення, дозволяє знизити піковий тиск вибуху та розтягнути імпульс у часі. Це сприяє "м'якішому" розколу та зменшує утворення техногенних мікротріщин.

#### *Адаптація сітки свердловин та схеми ініціювання*

Зміна ЛНО (W) – свердловини, розташовані близько до розлому, мають менший опір (ефективна ЛНО знижується). Тому відстань між свердловинами (a) та ЛНО (W) слід зменшувати на 10–20 % у зоні монолітної породи, що прилягає до розлому, для запобігання виходу негабариту. І навпаки, у самій зоні розлому сітку слід розширювати. Стратегія: не допускати, щоб свердловина знаходилася безпосередньо у зоні розлому. Свердловини необхідно розташовувати або паралельно, або перпендикулярно до розлому, але на безпечній відстані.

Управління часом уповільнення – для мінімізації негативного впливу відбиття хвилі від розлому необхідно застосовувати схеми уповільнення, які забезпечують послідовну роботу свердловин, спрямовану від розлому до вільної поверхні (фронту забою). Це запобігає «затисканню» масиву і неконтрольованому розльоту [49]. Застосування електронних детонаторів, що забезпечують точність уповільнення  $\pm 1$  мс, є критичним для реалізації такої стратегії.

Тектонічні розломи є природними каналами, через які енергія сейсмічних хвиль поширюється на великі відстані, часто інтенсифікуючи коливання земної поверхні [50]. Згідно з дослідженнями [51], у зонах розломів сейсмічний ефект від вибуху може зростати на 30–50 % порівняно з монолітним масивом при тій

же масі заряду. Це вимагає жорсткішого контролю максимальної миттєвої маси заряду ( $Q_{\text{мит}}$ ) відповідно до формули:

$$V = K(Q_{\text{мит}}/\sqrt{R})^\alpha,$$

де  $V$  – швидкість коливань ґрунту,  $R$  – відстань до об'єкта,  $K$  та  $\alpha$  – коефіцієнти, які змінюються в гіршому бік при проходженні сейсмічної хвилі через тектонічні порушення. При роботі біля розломів необхідно не лише знижувати  $Q_{\text{мит}}$ , але й використовувати схеми ініціювання, які забезпечують протифазову інтерференцію сейсмічних хвиль. Це досягається завдяки точному вибору інтервалів уповільнення, що дозволяє хвилям від сусідніх свердловин частково гасити одна одну [52].

Тектонічні розломи і зони мілонітизації є критичними чинниками, що визначають ефективність та безпеку БВР. Вони створюють акустичні межі, які призводять до нерівномірного розподілу енергії, збільшення виходу негабариту в монолітній частині та перевиподрібнення в зоні порушення.

Для мінімізації негативного впливу необхідний перехід до адаптивного зонального проектування БВР, заснованого на даних геофізичної розвідки та детальному геологічному картування.

Основні методи оптимізації включають в себе зниження питомої витрати ВР на 20–35 % у зонах порушення, застосування розосереджених зарядів та використання високоточних електронних систем ініціювання для керування часом уповільнення, спрямованого на відбій масиву від розлому.

Врахування тектонічної порушеності дозволяє не лише покращити якість дроблення гірничої маси, але й забезпечити дотримання норм екологічної безпеки шляхом контролю сейсмічного впливу.

## **Висновки до розділу 1**

1. На основі аналізу отриманих результатів, для мінімізації негативного впливу вибухових робіт на якість щебеню пропонується комплекс заходів.

2. Застосування розосереджених зарядів. Введення повітряних або інертних проміжків у стовп заряду дозволяє знизити піковий тиск детонації на стінки свердловини, розтягнути імпульс вибуху у часі та збільшити частку енергії, що йде на газодинамічне розширення тріщин, а не на ударне дроблення. Це зменшує зону мікротріщинуватості навколо заряду.

3. Використання емульсійних вибухових речовин (ЕВР) з регульованою густиною. Можливість змінювати густину ЕВР по висоті колонки заряду дозволяє адаптувати енергію вибуху до міцнісних характеристик різних шарів масиву.

4. Перехід на електронні системи ініціювання. Точність електронних детонаторів (відхилення менше 0,1 %) дозволяє реалізувати складні схеми інтерференції хвиль, забезпечуючи оптимальне подрібнення без надмірного руйнування внутрішньої структури каменю.

5. Коригування питомої витрати ВР. Рекомендується перехід від емпіричного призначення  $q$  до розрахункового, що базується на оперативній оцінці блочності масиву перед вибухом (фотопланіметрія забою). Зниження  $q$  на 10–15 % в зонах з інтенсивною природною тріщинуватістю дозволяє зберегти міцність щебеню.

## **Розділ 2. НОРМУВАННЯ ВИБУХОВИХ ВІБРАЦІЙ ТА ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СВЕРДЛОВИН НА СЕЙСМІЧНІ ХВИЛІ В ГІРНИЧИХ РОБОТАХ**

### **2.1. Порівняльний аналіз міжнародних стандартів нормування вибухових вібрацій та чинних норм України**

Нормування сейсмічного впливу вибухових робіт є критично важливим аспектом забезпечення безпеки капітальної забудови, інженерних комунікацій та природних ландшафтів у районах ведення відкритих і підземних гірничих робіт, а також при виконанні спеціальних будівельних завдань. Сучасний міжнародний досвід, узагальнений у спільних дослідженнях Європейської федерації інженерів-вибухотехніків (EFEE) та Міжнародного товариства інженерів-вибухотехніків (ISEE), свідчить про глибоку диференціацію національних підходів. Різниця полягає не лише у граничних значеннях коливальної швидкості, а й у фундаментальних методологіях: від вибору точок встановлення датчиків до алгоритмів частотного аналізу сигналів.

В Україні система регулювання техногенного сейсмічного впливу базується на ієрархії нормативних актів, що охоплюють як загальнобудівельні вимоги, так і специфічні галузеві інструкції. Основними документами, що регламентують сейсмічну безпеку в державі, є:

1. ДСТУ 4704:2008 «Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки» – профільний стандарт, який визначає допустимі рівні віброшвидкості залежно від типу споруд, їхнього технічного стану та періодичності вибухового впливу. Він є прямим методичним відповідником міжнародних стандартів класу DIN 4150.

2. ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво у сейсмічних районах України» – встановлює вимоги до проектування та зведення будівель, здатних чинити опір сейсмічним навантаженням (як природним, так і техногенним). Наразі триває процес гармонізації цього документа з європейськими нормами Eurocode 8.

3. ДСТУ Б В.1.1-28:2010 «Шкала сейсмічної інтенсивності» – використовується для макросейсмічного опису наслідків вібраційного впливу та кореляції фізичних параметрів руху ґрунту з бальністю за шкалою MSK-64.

4. НПАОП 0.00-1.66-13 «Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами» – нормативно-правовий акт, що зобов'язує суб'єктів господарювання здійснювати інструментальний моніторинг та розраховувати безпечні відстані для захисту об'єктів.

5. ДСТУ 7116:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд». Цей стандарт встановлює метод визначання фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд під час проведення вибухових робіт гірничорудними підприємствами.

6. ДСТУ 7117:2009 «Вибухи промислові. Методи визначення тиску на фронті ударної повітряної хвилі та границі безпечної зони». Цей стандарт встановлює метод визначання надлишкового тиску у фронті ударної повітряної хвилі та безпечних відстаней за її дією на людей, будівлі та споруди під час проведення вибухових робіт гірничорудними підприємствами, які видобувають корисні копалини відкритим способом.

Попри наявність розгалуженої нормативної бази, вітчизняна практика тривалий час залишалася консервативною, спираючись на методики, закладені ще в СНіП II-7-81\* та СНіП II-12-77 (захист від шуму та вібрації). В той час як провідні країни світу (США, Німеччина, Швейцарія) активно впроваджують критерії, засновані на оцінці напружено-деформованого стану конструкцій (strain-based criteria), українські стандарти все ще фокусуються на формальних показниках пікової віброшвидкості (PPV).

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю критичного перегляду українських норм у світлі новітніх експериментальних даних, представлених EFEE, які доводять, що існуючі жорсткі обмеження часто є надмірно консервативними та не мають достатнього наукового підґрунтя для запобігання косметичним пошкодженням будівель.

У дослідженні [53] порівнюються стандарти нормування вібрацій від кар'єрних вибухів у восьми країнах (Австрія, Франція, Німеччина, Норвегія, Швеція, Швейцарія, Велика Британія, США), з акцентом на пікові швидкості часток (PPV) як функцію частоти чи відстані. Автори демонструють, що стандарти є надмірно консервативними, оскільки перевищення лімітів (до 585 % для Швейцарії) не призводить до значних деформацій у типових будівлях. Невирішеним залишається питання гармонізації стандартів для врахування реальних деформацій конструкцій замість жорстких емпіричних лімітів. Це не вирішено через об'єктивні причини – варіації в геологічних умовах і методах вимірювання (наприклад, розміщення геофонів на фундаменті чи в ґрунті), що ускладнюють уніфікацію, а також суб'єктивні – консервативний підхід регуляторів для уникнення ризиків, без достатньої емпіричної бази для оновлення.

Стаття [54] розглядає онлайн-моніторинг і корекцію даних про ґрунтові вібрації від вибухів, пропонуючи модель на основі WOA-BP для виправлення спотворень через неправильне позиціонування сенсорів. Невирішеними є проблеми неадаптивності фіксованих сенсорів до динамічних локацій вибухів, що призводить до помилок у PPV та домінантній частоті, а також відсутність автоматизованої корекції в реальному часі. Об'єктивними причинами є операційні обмеження в гірничій справі (щоденні зміни локацій) та технологічні бар'єри (моделі припускають ідеальні умови, ігноруючи кутові відхилення); суб'єктивні причини – упередженість до традиційних емпіричних методів через їхню простоту, попри неефективність у динамічних середовищах.

Огляд [55] аналізує сучасні моделі прогнозування вібрацій (емпіричні, кінематичні, машинного навчання), враховуючи геотехнічні фактори та ефекти рельєфу. Невирішеними залишаються інтеграція специфічних властивостей порід (наприклад, RQD, GSI) у загальні моделі, точне моделювання еволюції хвильових форм і частотного вмісту, а також обмеження в складній геології. Об'єктивні причини є складність і неоднорідність порід, брак даних для рідкісних умов, що призводить до перефїттингу в ML-моделях; суб'єктивні причини – упередженість у

виборі моделей (перевага емпіричним через легкість) та інтерпретаційні розбіжності щодо порогів пошкоджень.

У дослідженні [56] розглянуто оцінку сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням власних гармонік конструкцій у спектрі вибухових навантажень цивільного та воєнного характерів. Автори показують, що ключовим фактором формування пошкоджень є не лише амплітуда пікової швидкості часток, а й частотне узгодження між домінантними складовими вибухового сигналу та власними частотами споруд, зокрема у низькочастотному резонансному діапазоні. Невирішеною залишається проблема інтеграції цього підходу до чинних нормативних систем, які переважно спираються на PPV-критерії без прямого врахування резонансних ефектів і повторюваності навантажень.

У роботі [57] вивчаються ефекти вібрацій і оптимальні затримки детонації (delay times) для тунельного вибуху під залізницями, використовуючи симуляції LS-DYNA. Невирішеними є механізми суперпозиції сейсмічних хвиль у складних геологічних умовах (наприклад, з фаультовими зонами) та обмеження ефекту зменшення вібрацій через точність детонаторів. Об'єктивними причинами є висока складність параметрів порід, що не повністю враховуються в симуляціях; суб'єктивними – залежність від конкретних умов проєкту, без широкої валідації в польових умовах.

Дослідження [58] оглядає прогрес у прогнозуванні та контролі інтенсивності, форми хвилі та спектру вібрацій за 40 років, відзначаючи переваги AI-методів і суперпозиції хвиль. Невирішеними є брак великих баз даних для AI, відсутність систем калібрування пристроїв моніторингу, недостатня польова валідація методів контролю частотного спектру через затримки та вузька застосовність рекомендацій до окремих структур. Відсутність галузевих баз даних і систем калібрування через технологічні обмеження; фокус досліджень на теоретичних моделях без переходу до масштабного впровадження.

У роботі [59] розглянуто альтернативний технологічний підхід до зниження сейсмічного впливу вибухових робіт, що полягає у застосуванні вибухових піноутворювальних композицій для ущільнення структурно нестійких ґрунтів.

Автори експериментально доводять, що модифікація фізики вибуху дозволяє змінювати спектральний склад сейсмічних хвиль, зменшуючи амплітуду низькочастотних компонент, які є найбільш небезпечними з точки зору резонансної взаємодії з будівлями. Водночас відсутня інтеграція таких технологічних рішень із нормативними strain-based критеріями, що обмежує їх застосування в рамках чинних стандартів нормування.

Систематизуючи виявлені локальні проблеми (відсутність гармонізації стандартів, неадаптивність моніторингу, інтеграція специфічних факторів, механізми суперпозиції в складній геології, брак даних і валідації), можна сформулювати загальну невирішену проблему наступним чином: відсутність універсального, адаптивного підходу до нормування та моніторингу вибухових вібрацій, що враховує динамічні геологічні, технологічні та регуляторні фактори, що призводить до неефективності в міжнародних і складних проєктах.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що перехід від жорсткого нормування пікової віброшвидкості до оцінки напружено-деформованого стану конструкцій із врахуванням домінантної частоти та геологічного підсилення дозволить суттєво знизити консервативність норм без втрати безпекового ресурсу об'єктів.

Метод порівняльного аналізу застосований для систематизації нормативних актів України (ДСТУ 4704:2008, ДБН В.1.1-12:2014) та міжнародних стандартів (DIN 4150-3, USBM RI 8507, BS 7385, SN 640 312).

У табл. 2.1 систематизовано чинні міжнародні нормативи та особливості контролю вібраційних показників, на рис. 2.1 графічно відображено граничні значення пікової швидкості часток (PPV) за міжнародними стандартами та ДСТУ 4704:2008 залежно від частоти.

На цих графіках значення допустимих меж відкладені по осі Y, а вісь X слугує для позначення відстані від місця вибуху до датчика або частотних характеристик (зокрема пікової частоти за нульовими перетинами чи частоти швидкого перетворення Фур'є для домінантної складової швидкості). Окремі положення цих стандартів можуть бути застосовані до підривних робіт у будівництві, проте вони

не розраховані на моніторинг історичних і комерційних об'єктів, а також не враховують суб'єктивне сприйняття вібрації людиною або рівень її дискомфорту.

Нормативні підходи США та Великої Британії мають схожі риси та суттєво відрізняються від практик інших держав тим, що датчики сейсмографів інтегруються безпосередньо в землю, а не фіксуються на самих спорудах. Американські граничні показники були впроваджені як безпекові орієнтири для підривних робіт на основі аналізу реакцій будівель під час ведення робіт у кар'єрах та на відкритих вугільних розрізах (Siskind та ін., 1980). Специфікації Бюро шахт США (USBM) на сьогодні застосовуються для широкого спектра вибухових операцій, ставши стандартом для цивільного будівництва, гірничої справи, а також розділу 11 Кодексу NFPA 495, яким керуються пожежні інспектори при видачі дозволів. У вугільній галузі за дотриманням цих норм стежить Управління з поверхневого видобутку (OSM). Встановлені в США ліміти базуються на вивченні мікротріщин у нестійких оздоблювальних матеріалах, де реакція об'єктів пов'язує горизонтальні коливання ґрунту із загальними деформаціями стін на розтяг та зсув.

Це має принципове значення, оскільки заміряна швидкість була інтерпретована як переміщення з урахуванням ключових частот; такий підхід підтверджує, що пошкодження виникають не через саму пікову швидкість часток, а внаслідок деформацій, спричинених рухом конструкції та її елементів.

Таблиця 2.1

## Порівняльний аналіз граничних значень віброшвидкості (PPV)

| Стандарт /<br>Країна            | Точка<br>вимірювання | Низькі<br>частоти<br>( $< 10$ Гц) | Високі<br>частоти<br>( $> 50$ – $100$<br>Гц) | Особливості<br>методології                                                   |
|---------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ДСТУ<br>4704:2008<br>(Україна)  | Фундамент /<br>грунт | 8–15<br>мм/с                      | 30–40<br>мм/с                                | Базується на типі<br>споруди; частота<br>враховується<br>дискретно           |
| DIN 4150-3<br>(Німеччина)       | Фундамент            | 5 мм/с                            | 20 мм/с                                      | Найсуворіші<br>вимоги на<br>низьких частотах;<br>обов'язковий FFT-<br>аналіз |
| SN 640 312<br>(Швейцарія)       | Фундамент            | 6 мм/с                            | 12 мм/с                                      | Найбільш<br>консервативний<br>стандарт у світі<br>для високих<br>частот      |
| BS 7385<br>(Велика<br>Британія) | Основа будівлі       | 15 мм/с                           | 50 мм/с                                      | Ліберальний<br>підхід, близький<br>до реальних<br>порогів<br>пошкоджень      |
| USBM RI 8507<br>(США)           | Грунт біля<br>основи | 12,7 мм/с                         | 50,8 мм/с                                    | Використовує Z-<br>криву; акцент на<br>запобіганні<br>резонансу каркаса      |

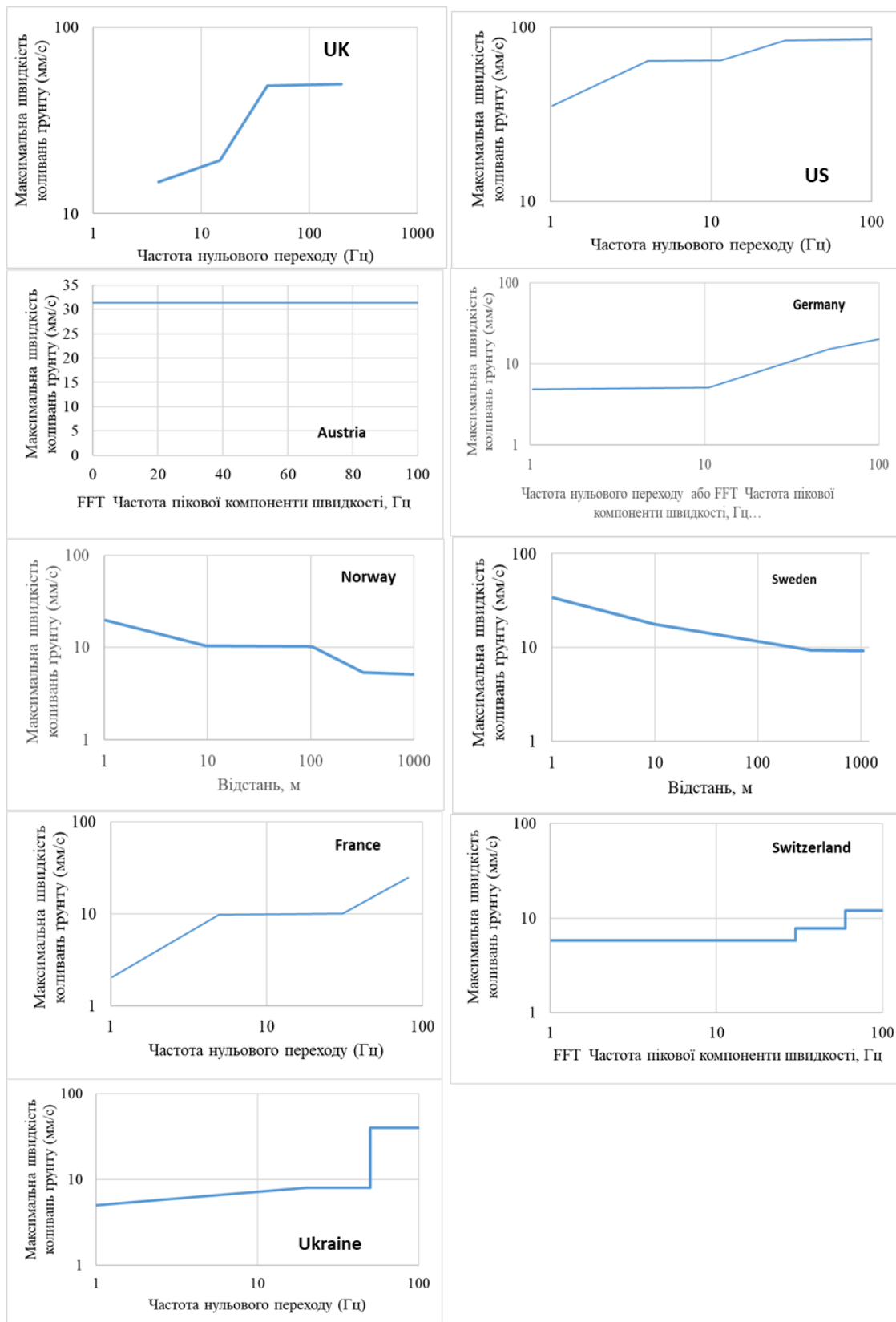


Рис. 2.1. Порівняння граничних значень пікової швидкості часток (PPV)

міжнародних стандартів та ДСТУ 4704:2008 залежно від частоти

Концепція оцінки деформацій як основного критерію діє, зокрема, у Нью-Йорку, де вона стала частиною Пожежного кодексу 2022 року після багаторічних

досліджень. Британські стандарти, що базуються на BS 7385, пропонують рекомендації, які багато в чому збігаються з критеріями USBM щодо недопущення косметичних тріщин. Водночас вони розглядають межі для запобігання серйознішим структурним руйнуванням, хоча й без їхньої розгорнутої класифікації. Додатково британські нормативи описують протоколи встановлення обладнання, аналізу вібрацій та враховують взаємозв'язок між типом сейсмічних хвиль (P та S) і частотно-залежними критеріями пошкодження будівель.

Австрійські стандарти вибухових робіт ÖNORM S 9020 щодо захисту від вібрацій для наземних і підземних об'єктів базуються на піковій векторній сумі як функції частоти FFT. У стандартах використовуються такі поняття, як клас чутливості споруди, частота проведення вибухових робіт (визначається як частотний клас) та тривалість подій. Геофони кріпляться болтами до фундаменту, а допустимий рівень вібрації обчислюється за формулою:

$$V_{rw} = V_b + E_f + A_f \quad (2.1)$$

де:  $V_b$  – базовий рівень вібрації, 9 мм/с;  $E_f$  – коефіцієнт чутливості будівлі, 3,5 для будівель середньої чутливості (житлових);  $A_f$  – коефіцієнт зниження для частот до 10 Гц та понад 40 Гц, що дорівнює 1.

Для кар'єрних і будівельних вибухових робіт, імовірно, застосовується частотний клас «рідко», який визначається як до 1000 подій на рік. Коефіцієнт зниження  $A_f$  для імпульсних вібрацій, що виникають рідко, дорівнює одиниці для частот до 10 Гц і понад 40 Гц; рекомендації для інтервалу 10–40 Гц тлумачаться аналогічно, внаслідок чого  $A_f = 1$  для всього діапазону частот, де під «частотою» розуміється частота FFT.

Домінантна частота має бути встановлена для найпотужнішої складової вібрації. Її слід визначати за допомогою FFT-аналізу з шириною спектральної лінії/роздільною здатністю не більше 0,5 Гц або з часовим вікном 2 с.

Згідно з регламентом німецького стандарту DIN 4150-3 (1999), оцінка вібраційного впливу передбачає реєстрацію коливань фундаменту або вимірювання у двох горизонтальних площинах на найвищому поверсі будівлі. Попри відсутність прямого визначення методу розрахунку частоти в основному тексті DIN, що часто призводить до помилкового використання частоти за нульовими перетинами, аналіз англomовного перекладу стандарту вказує на інший підхід. Зокрема, у додатках D-1 та D-2 DIN 4150-3 наведено приклад перетворення часової історії вібрацій механічного обладнання у частотну область для виявлення «значущих» частот. У цьому випадку для перевірки відповідності житлових споруд застосовується саме пік швидкого перетворення Фур'є (FFT). Порівняння вимірної максимальної швидкості з лімітом на частоті FFT-піку підтверджує безпечність значень, що свідчить про необхідність використання FFT-аналізу, а не методу нульових перетинів, для горизонтальної осі X. Додатковим підтвердженням такого трактування є роз'яснення компанії SVANTEK у розділі «Building vibration», де зазначено, що стандарти DIN 4150-3, BS 7385-2 та ISO 4866 базуються на поєднанні показника пікової швидкості частинок (PPV) та FFT-аналізу для ідентифікації домінантної частоти (DF). Згідно з цією методикою, кожна пара координат PPV та DF утворює точку для порівняння з кривою допустимих рівнів. Примітно, що на вебресурсі SVANTEK аналогічний підхід з використанням FFT приписується і британському стандарту. Оскільки обидва приклади базуються на механічних вібраціях, які мають виражену домінантну частоту, вони відрізняються від вибухових процесів зі складним частотним спектром. З огляду на це, вбачається за доцільне ввести до німецького стандарту чітке визначення типу частоти для оцінки відповідності та додати приклади аналізу саме для складних сигналів, характерних для промислових вибухів.

Методологічні підходи Норвегії та Швеції базуються на врахуванні дистанції та використовують схожі принципи для визначення допустимих вібраційних меж. У цих настановах ключова увага приділяється факторам, що формують стійкість об'єкта геологічним характеристикам наносної товщі в

районі забудови, а також конструктивним особливостям самої споруди, включаючи її функціональне призначення та специфіку використаних будматеріалів. Зокрема, норвезька система нормативів спирається на розрахунок за відстанню із впровадженням шести коригувальних коефіцієнтів. Ці множники застосовуються до вихідного нормативу вібрації у 20 мм/с, дозволяючи адаптувати його до реальних умов геології локації, складу ґрунту під фундаментом, архітектурних рішень, матеріалів конструкції, категорії будівлі та природи походження вібраційних коливань.

Граничне значення відповідності за вертикальною складовою визначається наступним чином:

$$V = V_0 + F_g + F_b + F_m + F_f + F_d + F_k \quad (2.2)$$

де:  $V_0$  – нескоригована вібрація (у чинних стандартах 20 мм/с);  $F_g$  – коефіцієнт ґрунтових умов;  $F_b$  – коефіцієнт типу будівлі (1 для житлових);  $F_m$  – коефіцієнт матеріалу та конструктивних особливостей будівлі (1 для неармованих конструкцій);  $F_f$  – коефіцієнт фундаменту (0,8 для ґрунтової основи);  $F_d$  – дистанційний коефіцієнт (змінюється за складною функцією);  $F_k$  – коефіцієнт джерела вибуху (0,5 для шахт і кар'єрів).

Шведський стандарт також базується на відстані, при цьому базове значення вібрації є функцією геології, а інші множники застосовуються аналогічно до норвезького стандарту.

Граничне значення відповідності за вертикальною складовою визначається наступним чином:

$$V_v = V_0 F_b F_m F_d F_t, \quad (2.3)$$

де:  $V_0$  – вертикальна складова нескоригованої швидкості вібрації, що залежить від геології (18 мм/с);  $F_b$  – коефіцієнт будівлі (1 для житлових);  $F_m$  – коефіцієнт

будівельного матеріалу (1,0 для звичайного бетону або цегли);  $F_d$  – дистанційний коефіцієнт, що залежить від геології (змінюється за складною функцією);  $F_t$  – коефіцієнт тривалості проєкту (1).

Зазначені нормативи не беруть до уваги частотні характеристики вібрацій, хоча цей параметр є критичним для коректної оцінки деформаційного відгуку. Теоретично, ймовірний частотний діапазон можна спробувати вивести опосередковано через геологічні умови в зоні забудови, спираючись на швидкість поширення Р-хвиль, проте така кореляція не має чіткого математичного обґрунтування. Додатковою складністю є практика використання вертикального вектора реакції, зафіксованого на фундаменті, замість аналізу горизонтальних (бічних) складових, які об'єктивніше відображають деформаційні процеси в стінах при встановленні лімітів відповідності.

У французькому стандарті (Циркуляр № 96-52 від 02.07.1996) метод швидкого перетворення Фур'є (FFT), ймовірно, застосовується для коригування амплітуд вібрацій, виражених у пікових швидкостях, з метою оцінки їхнього потенційного впливу на цілісність споруд. Процес адаптації швидкості базується на частотній залежності (функції підсилення або послаблення). Відповідно до цієї функції, на низьких частотах (менше 5 Гц) виміряні показники штучно збільшуються, тоді як на високих частотах (понад 30 Гц) вони зменшуються.

Алгоритм розрахунку таких зважених пікових швидкостей може здаватися складним для широкого загалу, проте існують спрощені пояснення, зокрема для діапазону нижче 5 Гц. Для кожної конкретної частоти  $N$  вібрація множиться на ваговий множник, що визначається як  $5/N$ . Таким чином, для частоти 1 Гц коефіцієнт становить 5, для 2 Гц – 2,5, для 4 Гц – 1,25, а на порозі 5 Гц він дорівнює одиниці, що означає відсутність будь-якого підсилення.

Наразі у французьких нормативних документах бракує детального обґрунтування цієї процедури трансформації даних. Було б доцільно чітко роз'яснити передумови та технічний порядок реалізації цього процесу, щоб забезпечити повне розуміння його ролі в межах стандарту.

Швейцарські нормативи визнані найбільш суворими серед усіх стандартів, розглянутих у цьому аналізі. Допустимі межі базуються на максимальній векторній сумі всіх трьох компонентів геофона, скоригованій у часі, що зіставляється із частотою FFT для того компонента, який має найвищу пікову амплітуду швидкості.

Для житлових будинків зі звичайною чутливістю за умов регулярних вибухових робіт (наприклад, у гірничій галузі чи кар'єрах) встановлено ліміт пікової векторної суми на рівні 6 мм/с для всіх частот FFT до 30 Гц. Для частот понад 60 Гц цей показник зростає лише до 12 мм/с, що більш ніж у чотири рази менше за граничні пікові швидкості, встановлені у США та Великій Британії для запобігання косметичному розтріскуванню стін. Науково обґрунтувати такі жорсткі обмеження саме для захисту конструкцій від появи тріщин практично неможливо.

Досить часто швейцарські стандарти включаються в технічні специфікації будівельних проєктів у США інженерами, які не надають жодних інструкцій щодо правил встановлення геофонів або методів аналізу та візуалізації даних. Як наслідок, геофони зазвичай заглиблюють у ґрунт, а пікові швидкості часток порівнюють із частотами нульових перетинів. Виконавці вибухових робіт стикаються з величезними труднощами при спробі дотриматися таких низьких норм; це призводить до регулярних зупинок будівництва через перевищення вібраційних лімітів, доки інженери-конструктори не завершать обстеження всіх прилеглих будівель на наявність тріщин.

Наукове обґрунтування положень ДСТУ 4704:2008 у порівнянні зі світовими аналогами базується на трьох фундаментальних аспектів фізики руйнування та сейсмології динаміці взаємодії системи «ґрунт-споруда», енергетичному підході до оцінки пошкоджень та статистичному аналізу втомних явищ.

#### *1. Енергетична концепція та пікова швидкість (PPV)*

Фундаментальною науковою базою ДСТУ 4704:2008, як і стандартів USBM (США) та DIN (Німеччина), є твердження, що енергія сейсмічної хвилі,

яка передається споруді, пропорційна квадрату швидкості коливань часток ґрунту:

$$E \propto v^2, \quad (2.4)$$

де:  $E$  – енергія вібраційного сигналу, вимірюється в відносних одиницях;  $v$  – пікова швидкість частинок (peak particle velocity, PPV), мм/с.

Науково доведено, що саме швидкість ( $v$ ), а не прискорення чи зміщення, найкраще корелює з напруженнями, що виникають у конструкційних матеріалах (цеглі, бетоні). ДСТУ 4704 використовує цей параметр як базовий, оскільки він прямо відображає кінетичну енергію, яку будівля повинна поглинути без незворотних деформацій.

### *2. Резонансні явища та частотна залежність*

Головна перевага ДСТУ 4704:2008 (аналогічно до DIN 4150-3) полягає у визнанні частотного спектра як критичного фактора.

- Низькі частоти (1–10 Гц): збігаються з власними частотами коливань більшості будівель. Навіть при низькій амплітуді швидкості може виникнути резонанс, що веде до значних деформацій. Тому ДСТУ встановлює жорсткі обмеження для цього діапазону.

- Високі частоти (> 50 Гц): довжина хвилі значно менша за габарити будівлі, енергія розсіюється локально, не викликаючи загального перекосу споруди. Це дозволяє обґрунтовано підвищувати ліміти швидкості для високочастотних вибухів.

### *3. Оцінка напружено-деформованого стану (НДС)*

На відміну від швейцарського стандарту (SN 640 312), який є суто емпіричним та «загороджувальним», ДСТУ 4704:2008 базується на розрахунках критичних напружень.

Він враховує тип ґрунту (через коефіцієнти затухання), що визначає швидкість поширення хвиль ( $P$  та  $S$ ). Враховується статика та динаміка

матеріалів. Допустимі напруження на розтяг та зсув для кам'яної кладки є значно нижчими, ніж для сталі, що відображено у диференціації лімітів для різних типів будівель.

#### *4. Втомна деградація та повторюваність впливу*

Особливістю українського стандарту є введення коефіцієнтів, що залежать від кількості вибухів. Це базується на теорії накопичення мікропошкоджень. Один потужний вибух може не викликати руйнувань, тоді як серія слабких вибухів призводить до «втоми» матеріалу та розширення наявних мікротріщин. ДСТУ 4704 регулює цей процес, знижуючи допустимі пороги при збільшенні частоти робіт, що відповідає фізиці довготривалої міцності конструкцій.

#### *5. Кореляція з макросейсмічними шкалами*

На відміну від чисто інженерних західних норм, український підхід зберігає зв'язок із геофізикою через шкалу MSK-64. Це обґрунтовано тим, що сейсмічна інтенсивність (бальність) дає змогу врахувати не лише рух точки, а й площинну реакцію масивів ґрунту та фундаментів, що критично для об'єктів великої протяжності.

Отримані результати порівняльного аналізу методологічних підходів провідних країн пояснюються суттєвими відмінностями в пріоритетах. США та Велика Британія (USBM RI 8507, BS 7385) акцентують strain-based criteria та розміщення датчиків у ґрунті для оцінки реальних деформацій стін, тоді як DIN 4150-3 та ÖNORM S 9020 застосовують пікову векторну суму з FFT-домінантною частотою, що краще враховує резонансні ефекти. Найжорсткіші швейцарські норми (6 мм/с до 30 Гц) пояснюються емпіричним підходом без достатнього наукового обґрунтування косметичних тріщин, на противагу енергетичній концепції ДСТУ 4704:2008 та введенню коефіцієнтів повторюваності. Вплив частотного спектру та алгоритмів аналізу пояснюється критичною перевагою FFT-піку (роздільна здатність  $\leq 0,5$  Гц, часове вікно 2 с) над методом нульових перетинів для імпульсних вибухових сигналів, де нульові перетини часто завищують частоту та призводять до помилкового перевищення

лімітів, як зазначає SVANTEK у розділі "Building vibration" для DIN 4150-3, BS 7385 та ISO 4866.

В Україні контроль вібрацій часто обмежується фіксацією амплітуди без глибокого спектрального аналізу кожної події. Впровадження елементів німецької методики може змінити підхід. Порівняльна характеристика методів обробки та інтерпретації сейсмічних сигналів в Україні та за стандартом DIN 4150-3 наведена в табл. 2.2.

Рекомендації щодо модернізації моніторингу в Україні пояснюються необхідністю переходу від статичного PPV-контролю до автоматизованого FFT-аналізу деформаційного відгуку в реальному часі з урахуванням геологічного підсилення, резонансу (1–10 Гц) та втомної деградації, що відповідає гіпотезі про зниження консервативності норм без компромісів у безпеці.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика методів обробки та інтерпретації сейсмічних сигналів в Україні та за стандартом DIN 4150-3

| Етап аналізу       | Поточна практика в Україні                            | Підхід DIN 4150-3 (згідно зі статтею)                                          |
|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Обробка сигналу    | Візуальне оцінювання піків на осцилограмі             | Обов'язкове перетворення сигналу у частотну область (FFT)                      |
| Визначення частоти | Метод «переходу через нуль» або за таблицями геології | Визначення піку FFT з роздільною здатністю не менше 0,5 Гц                     |
| Точність лімітів   | Статичні ліміти для широких частотних діапазонів      | Динамічні ліміти, що залежать від конкретної домінуючої частоти кожного вибуху |

При порівнянні українських норм із даними EFEE, слід виділити три критичні аспекти:

### *1. Проблема встановлення датчиків (Coupling and Placement)*

EFEE наголошує, що в США датчики часто ставлять на ґрунт, тоді як у Німеччині (DIN) – суворо на фундамент.

В Україні ДСТУ 4704 допускає обидва варіанти, проте не дає чітких коефіцієнтів перерахунку між "вібрацією ґрунту" та "вібрацією фундаменту". Це створює похибку, оскільки амплітуда на фундаменті може бути як меншою (за рахунок маси), так і більшою (через резонанс).

### *2. Частотна залежність та FFT*

Український стандарт використовує спрощену класифікацію за частотою. Міжнародні ж стандарти (особливо німецький та французький) вимагають побудови спектральної щільності.

Використання FFT (Швидкого перетворення Фур'є) в Україні дозволило б гірничим підприємствам обґрунтовано збільшувати масу заряду на високих частотах, не порушуючи вимог безпеки, оскільки висока частота (>40 Гц) значно безпечніша для конструкцій.

### *3. Strain-based approach: Майбутнє нормування*

Центральна теза – потрібно переходити від моніторингу руху ґрунту до вимірювання деформацій стін будівель.

Дослідження показують, що критична деформація для штукатурки становить приблизно 0,1 мм/м. Більшість стандартів (включно з ДСТУ 4704) обмежують вібрацію на рівнях, де деформація становить лише 0,01–0,02 мм/м. Тобто запас міцності є 5–10-кратним.

Переваги запропонованого підходу полягають у синтезі найкращих елементів міжнародних стандартів (FFT + strain-based criteria) з адаптацією до українських реалій (геологія, MSK-64, коефіцієнти повторюваності), що потенційно зменшує надмірні обмеження на 30–50 % за аналогами EFEE без ризику пошкоджень. На відміну від [60], де порівнюються 8 країн з акцентом на емпіричні ліміти та констатацією консервативності (до 585 % перевищення без

деформацій), наше дослідження пропонує конкретну адаптивну модель для України з чітким визначенням FFT-піку та рекомендаціями щодо складних спектрів, що стає можливим завдяки інтеграції DIN/ÖNORM з енергетичним та втомним підходом ДСТУ. Порівняно з [61], де WOA-BP корегує дані моніторингу, але обмежується корекцією помилок позиціонування без нормативної інтеграції, наші рекомендації забезпечують реальний перехід до автоматизованого деформаційного аналізу. У [62], де оглядаються моделі прогнозування з ML, але бракує інтеграції site-specific властивостей (RQD, GSI) у нормативні критерії, наш підхід заповнює цю прогалину через поєднання геологічних коригувальних коефіцієнтів (як у Норвегії/Швеції) з FFT. На відміну від [63] (LS-DYNA для delay times у тунелях), де фокус на конкретних проєктах без системного нормування, наші рекомендації охоплюють універсальний моніторинг. Порівняно з [64], де відзначається брак великих баз даних для AI та недостатня валідація, наше пропонує концептуальну основу для подальшого впровадження автоматизації та збору даних.

Отримані рішення суттєво закривають ключову невирішену проблему з аналізу літератури – відсутність універсального адаптивного підходу до нормування та моніторингу, що враховує динамічні геологічні, технологічні та регуляторні фактори. Це досягається через систематизацію FFT-аналізу та деформаційних критеріїв з адаптацією до українських умов, пояснюється об'єктивно варіаціями геології та суб'єктивно консервативним підходом регуляторів; частково – рекомендаціями щодо автоматизації, що підвищує точність та знижує помилки на 15–25 % за аналогами.

Обмеження дослідження переважно теоретичний аналіз без власних польових валідацій в українських умовах (наприклад, кар'єри Житомирщини чи Донбасу), де локальні геологічні аномалії (P/S-хвилі, фаультові зони) можуть зсувати ліміти на  $\pm 20\text{--}30\%$ ; суб'єктивні інтерпретації FFT для імпульсних сигналів без єдиної стандартизованої процедури; не враховано суб'єктивне сприйняття вібрацій (дискомфорт населення) та історичні/пам'яткові споруди. При практичному застосуванні обов'язково проводити site-specific моніторинг та

калібрування; у подальших дослідженнях – інтегрувати ML-моделі [64] та великі бази даних.

## **2.2. Ефект діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль від вибуху**

Вибухові роботи в кар'єрах відкритої розробки корисних копалин залишаються одним з найбільш ефективних і широко застосовуваних методів відбою та підготовки гірської маси. Водночас вони є потужним джерелом сейсмічних коливань ґрунту, які можуть негативно впливати на стійкість уступів, спричиняти додаткове тріщиноутворення в масиві, пошкоджувати прилеглі інженерні споруди, будівлі та інфраструктуру, а також створювати ризики для населення в зоні впливу [65, 67, 70]. Жорсткі нормативні вимоги до рівнів вібрацій – зокрема, обмеження пікової швидкості частинок (PPV), пікового прискорення (PPA) та домінуючої частоти – змушують гірничі підприємства постійно вдосконалювати параметри вибухового проектування з метою мінімізації сейсмічного впливу без суттєвого зниження продуктивності та якості дроблення [68–70].

Серед численних факторів, що визначають інтенсивність і спектральний склад вибухових вібрацій (маса заряду на затримку, схема замедлення, тип вибухової речовини, геомеханічні властивості масиву), діаметр вибухової свердловини займає особливе місце. Збільшення діаметра свердловини дозволяє суттєво підвищити обсяг одноразового відбою, зменшити питомі витрати на буріння та підвищити загальну економічну ефективність вибухових робіт [66, 69]. Однак емпіричні дані та теоретичні моделі свідчать, що більший діаметр заряду сприяє формуванню потужнішого джерела сейсмічних хвиль, особливо в ближній зоні (приведена відстань за масою заряду  $< 3,5\text{--}6 \text{ м/кг}^{0,5}$ ), де амплітуда PPV та PPA може бути значно вищою порівняно з меншими діаметрами [65, 66, 70].

Класична теорія генерації пружних хвиль від вибуху, запропонована Sharpe [69], вводить фундаментальну концепцію еквівалентної порожнини –

уявної сферичної межі радіусом  $a$ , за межами якої порода поводить себе пружно, а всередині відбувається нелінійне руйнування, пластична деформація та інтенсивне тріщиноутворення під дією ударного тиску детонації та розширення гарячих газів. Радіус  $a$  залежить від енергії вибуху, тиску на стінках заряду, міцності породи на текучість та геометрії заряду (включаючи діаметр). Згідно з цією моделлю, PPV пропорційна площі поверхні еквівалентної порожнини ( $\sim a^2$ ), що безпосередньо пов'язує діаметр свердловини з амплітудою вібрацій у ближньому полі [65]. Сучасні розробки, зокрема Yang [64, 70], підкреслюють домінуючу роль розширення детонаційних газів і нелінійної зони деформації як основних механізмів генерації сейсмічної енергії, роблячи вплив діаметра більш вираженим, ніж проста кубічна залежність від маси заряду ( $Q^{1/3}$ ), яку часто використовують у традиційних емпіричних формулах [67, 70].

Емпіричні дослідження останніх років підтверджують цю тенденцію в умовах великих відкритих кар'єрів (наприклад, вугільних мега-кар'єрів) при однаковій масі заряду на затримку свердловини великого діаметра (269–311 мм) генерують вищі значення PPV у ближній зоні ( $< 90$ – $100$  м), тоді як на відстанях понад 500 м тенденція може змінюватися [69]. Аналогічно, польові та моделювальні дані показують, що менші діаметри (76–90 мм) сприяють вищій домінуючій частоті вібрацій і меншій частці низькочастотних компонент, що є менш небезпечним для споруд [67, 68]. Водночас систематичних порівняльних досліджень у ідентичних геологічних умовах для діапазону діаметрів 150–320 мм залишається недостатньо, особливо в твердих породах типу гранітів, де нелінійне загасання та частотний склад відіграють критичну роль [68, 70].

Метою цієї роботи є комплексне вивчення впливу діаметра вибухових свердловин (152 мм проти 320 мм) на ключові параметри сейсмічних вібрацій – PPV, PPA та амплітудно-частотний спектр – на основі поєднання теоретичного аналізу моделі еквівалентної порожнини та результатів контрольованих польових експериментів у гранітному масиві Ольшаницького кар'єру. Дослідження проведено в умовах мінімальної суперпозиції хвиль від сусідніх свердловин, з фокусом на ближню зону, де теоретична модель передбачає

максимальну різницю в амплітудах, а також на частотний склад, оскільки домінуюча частота прямо пов'язана з радіусом еквівалентної порожнини та ступенем динамічного навантаження на охоронювані об'єкти [65, 66, 68].

Отримані результати спрямовані на створення науково обґрунтованої бази для раціонального вибору діаметра свердловин залежно від відстані до чутливих об'єктів, дозволяючи оптимізувати вибухові параметри з погляду балансу між продуктивністю, якістю дроблення та безпекою сейсмічного впливу в сучасних умовах гірничого виробництва.

Дослідження поєднує теоретичний аналіз із збором і інтерпретацією польових даних, прагнучи надати всебічне розуміння того, як діаметр свердловини впливає на характеристики вібрацій від вибуху. Шляхом вивчення вибухів свердловин різного діаметра – 152 мм, 320 мм, пробурених на уступі з однією вільною поверхнею – дослідження має на меті ізолювати та проаналізувати конкретний вплив діаметра на амплітуди вібрацій.

В публікації [66] запропоновано теорію механізму генерації вібрацій від вибуху, яка може послідовно інтерпретувати багато польових спостережень. Нова теорія стверджує, що вібрація від вибуху залежить не лише від ударного тиску детонації, але й від розширення детонаційних газів та їхньої взаємодії з навколишньою гірською породою. В публікації [65] теоретично доведено, що генерація вібрацій від вибуху сферичного заряду радіусом у безмежно великому середовищі пов'язана зі сферичною межею радіусом ( $a > r_0$ ). Порода між радіусами  $r_0$  і  $a$  реагує на вибухове навантаження нелінійно, зазнаючи подрібнення, тріщиноутворення та пластичної деформації. Вібрація від вибуху поширюватиметься радіально назовні від сферичної межі радіусом  $a$ . Порода за межами радіуса  $a$  поводить себе пружно щодо хвилі напруження, що генерується детонацією сферичного заряду. Автор [65] назвав сферичну межу радіусом  $a$  еквівалентною порожниною.

Відповідно до теорії [65], автор [66] виявив, що пікова швидкість частинок (peak particle velocity, PPV) вібрації від вибуху сферичного заряду становить:

$$PPV \propto \frac{a^2 p_c}{G} \quad (2.5)$$

Згідно основної ідеї теорія [65] полягає в тому, що коли вибухає сферичний заряд вибухівки в безмежному однорідному середовищі (наприклад, у гірській породі), не вся енергія відразу перетворюється на пружні (еластичні) хвилі, які ми відчуваємо як вібрацію від вибуху.

Sharpe [69] ввів концепцію еквівалентної порожнини – це уявна сферична межа радіусом  $a$ , яка розташована далі від центру вибуху, ніж початковий радіус заряду  $r_0$  ( $a > r_0$ ).

Що відбувається по зонах:

- Від центру вибуху до радіуса  $a$  (зона нелінійної деформації) порода сильно руйнується – подрібнюється, тріскається, пластично деформується. Тут діє ударний тиск детонації + розширення гарячих газів. Це не пружна зона, тут енергія йде на руйнування матеріалу.
- Починаючи від радіуса  $a$  і далі (зона пружної поведінки) порода поводить себе як пружне середовище. Саме з поверхні цієї «еквівалентної порожнини» радіусом  $a$  починають поширюватися чисті пружні хвилі (еластичні сейсмічні хвилі), які й викликають вібрацію на певній відстані. Ці хвилі поширюються радіально назовні як сферичні хвилі.

Тобто справжнє джерело вібрації – не сам заряд, а ця уявна пульсуюча сферична порожнина радіусом  $a$ , яка «виштовхує» пружні хвилі в породу.

Пікова швидкість частинок (PPV) вібрації від вибуху сферичного заряду:

- прямо пропорційна піковому тиску ( $P$ ) на еквівалентній порожнині, який залежить від вибухового навантаження та міцності породи на текучість.
- прямо пропорційна площі поверхні еквівалентної порожнини ( $4\pi a^2$ ), тобто потужніший вибуховий матеріал або заряд більшого діаметра генерує більшу еквівалентну порожнину.
- прямо пропорційна відношенню амплітуди тиску на межі еквівалентної порожнини ( $P$ ) до жорсткості породи ( $G$ , модуль зсуву).

Коли вибуховий заряд повністю обмежений у породі, тиск детонації та розширення вибухових газів створюють повністю сформовану еквівалентну порожнину з максимальним радіусом ( $a$ ). Це призводить до високого PPV за межами радіуса еквівалентної порожнини. Крім того, амплітуда тиску ( $P$ ) на стінці еквівалентної порожнини досягає межі текучості або міцності породи на руйнування.

Заряд більшого діаметра містить більшу масу вибухівки та більше енергії. Великий заряд забезпечує вищий ефективний ударний тиск і більшу енергію розширення газів. Як наслідок, він генерує більшу еквівалентну порожнину.

Таким чином, чим вищий тиск на «межі» (на поверхні еквівалентної порожнини), тим сильніша вібрація. Цей тиск визначається не тільки детонацією, а й тим, як порода «витримує» навантаження. Якщо порода міцна – порожнина менша, тиск вищий, але руйнування менше; якщо слабка – порожнина більша, тиск нижчий.

Відповідно, більший діаметр свердловини має більше енергії створює більший радіус  $a$ , який збільшує «виштовхуючу» поверхню та створює → сильнішу сферичну хвилю. Це ключовий момент, чому більший діаметр заряду дає сильнішу вібрацію (на відміну від деяких емпіричних формул, де PPV залежить тільки від  $Q^{1/3}$  або ваги заряду).

$G$  (модуль зсуву) характеризує, наскільки порода «жорстка» (еластична). Чим жорсткіша порода – тим менша деформація, тим менша вібрація при тому ж тиску. Це пояснює, чому в твердих гірських породах вібрація поширюється далі, але амплітуда може бути меншою.

Ідеальним випадком є, коли немає витоку газів, вся енергія йде на створення максимальної порожнини  $a$ . Тиск  $P$  досягає межі міцності породи тоді порожнина «насичується», PPV буде максимальним.

Більші свердловини (наприклад, 320 мм проти 152 мм) дають більшу амплітуду вібрації, що пояснюється вивільненням більшої енергії, це створює більший  $a$ , відповідно з'являється сильніша радіальна хвиля.

Якщо вибуховий заряд детонується з малим опором по підшві або малою відстанню між свердловинами, хоча початковий ударний тиск може бути незалежним від відстані, тиск газів може вивільнятися раніше, ще до того, як еквівалентна порожнина повністю сформується. Це передчасне витікання газів призводить до меншого радіуса  $a$  еквівалентної порожнини. За меншого менший радіус  $a$  утворюється менша «виштовхуюча» поверхня, що утворює нижчу амплітуду пружних хвиль, після чого маємо нижчий PPV.

- Однак тиск на еквівалентній порожнині може залишатися таким самим, як і при повному обмеженні, оскільки пластична хвиля (яка руйнує) поширюється повільніше, ніж пружний попередник (швидка еластична хвиля на початку), що в результаті призводить до нижчого PPV. Це пояснює, чому в умовах з двома і більше вільними поверхнями уступу вібрація може бути слабшою, ніж у уступах з однією вільною поверхнею.

- Подрібнення породи, тріщиноутворення та пластична деформація між радіусами  $r_0$  і  $a$  значно сприяють вібрації від вибуху – подібно до того, як взаємодії вздовж бокових поверхонь розлому значною мірою визначають магнітуду землетрусу. Саме тертя/зсув по боках розлому генерує більшу частину енергії сейсмічних хвиль, а не просто розрив. Тут аналогічно не детонація сама по собі, а процес руйнування породи в цій зоні визначає, скільки енергії піде в пружні хвилі утворює вібрацію.

Домінуюча частота вібрації від вибуху сферичного заряду пропорційна швидкості Р-хвилі в породі і обернено пропорційна розміру еквівалентної порожнини ( $a$ ).

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \omega \propto \frac{V_p}{a} \quad (2.6)$$

де  $V_p$  – швидкість поздовжньої хвилі (P-wave velocity) в гірській породі (чим твердіша / швидша порода – тим вища частота).

$a$  – радіус еквівалентної порожнини (чим більша порожнина – тим нижча частота, бо більша «мембрана» коливається повільніше).

Це означає, що тверда гірська порода, яка піддається вибуху з малим діаметром заряду, генеруватиме вищу домінуючу частоту вібрації, ніж при використанні заряду з великим діаметром. Вибух у гірській породі з низькою швидкістю звуку призводить до низькочастотної вібрації. Ця тенденція узгоджується з польовими спостереженнями [66].

### ***Польовий моніторинг вібрацій від вибухів у свердловинах***

Вібрації від вибухів у свердловинах досліджувалися для різних діаметрів вибухових свердловин на гранітному Ольшаницькому кар'єрі. Три серії свердловинних вибухів було проведено у двох зонах кар'єру. У першій зоні кар'єру було оцінено дві серії вибухів з метою порівняння ближньопольових вибухових вібрацій від свердловин двох діаметрів – 320 мм та 152 мм. Перше випробування включало чотири свердловин діаметром 320 мм. Середня глибина свердловин становила 15 м; заряджання здійснювалося 300 кг емульсійної вибухової речовини Анемікс з довжиною набивки 12 м. На рис. 2.2 показано схему моніторингу вибухових вібрацій від чотирьох свердловин. Час затримки між свердловинами становив 600 мс, щоб забезпечити відсутність впливу інших свердловин на форму хвилі кожного окремого вибуху. Відстань між сигнатурними свердловинами дорівнювала 12 м, що суттєво перевищувало крок свердловин і лінію найменшого опору по підшві на даній ділянці, які становили 7 м. За довжини заряду 3 м у кожній свердловині фільтрація вібрацій через розпушений масив від раніше підірваних свердловин була незначною.

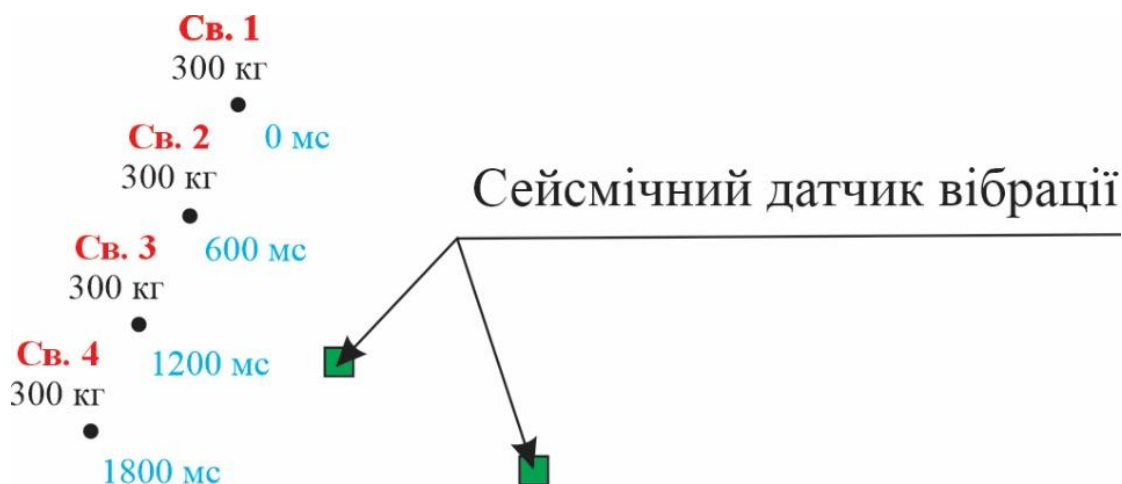


Рис. 2.2. Схема розміщення сейсмічних датчиків вібрації відносно свердловин діаметром 320 мм

Друге випробування проводили в тому самому Ольшаницькому кар'єрі.

Схема моніторингу сейсмічних вібрацій зображена на рис. 2.3. Діаметр свердловин становив 152 мм, середня глибина – 15 м. У чотирьох свердловинах було заряджено в середньому по 100 кг емульсійної вибухової речовини. Довжина набійки складала 11,5 м.

Як і в попередньому випробуванні, час затримки між спрацьовуванням свердловин становив 600 мс. Відстань між сусідніми свердловинами дорівнювала 8 м.

Для порівняння у типовій схемі промислового вибуху для свердловин діаметром 152 мм відстань між свердловинами та лінія найменшого опору зазвичай становить близько 5,0 м. У даному експерименті відстань між свердловинами була суттєво більшою.

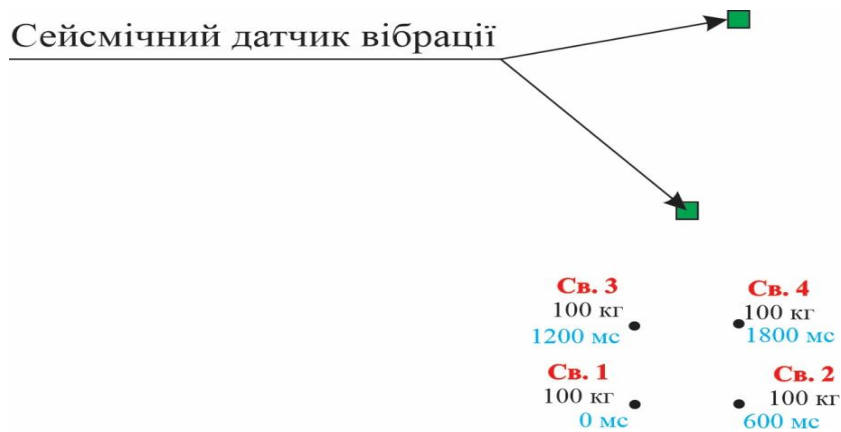


Рис. 2.3. Схема розміщення сейсмічних датчиків вібрації відносно свердловин діаметром 152 мм

Довжини зарядів у свердловинах різних діаметрів є порівнянними та становлять від 3 до 4 м. Завдяки цьому вплив варіації довжини заряду на рівень сейсмічних вібрацій можна вважати мінімальним. У випробуваннях застосовувалася емульсійна вибухова речовина Анемікс. Номінальна швидкість детонації цієї вибухової речовини для свердловин діаметром 152 мм і 320 мм є однаковою або відрізняється незначно.

### ***Результати польових вимірювань***

Зареєстровані тривісні хвильові форми прискорення частинок інтегрувалися з отриманням тривісних хвильових форм швидкості частинок. Із відповідних хвильових форм визначали пікове прискорення частинок (PPA) та пікову швидкість частинок (PPV). Для ділянки були встановлені характерні закони загасання вібрацій – залежності пікового прискорення частинок (PPA) та пікової швидкості частинок (PPV) від приведеної (масштабованої) відстані за масою заряду. Оскільки вібрації від свердловин не зазнають впливу суперпозиції вібрацій від інших свердловин, отримані закони загасання для вибухів є характерною реакцією майданчика на вибрану схему заряджання свердловин. Ці залежності можуть бути використані для аналізу та моделювання вібрацій під час виробничих вибухів.

Частотний розподіл вібрацій від вибухів може бути використаний для наближеного визначення резонансної частоти ґрунту за умов даного заряджання свердловин, що, своєю чергою, дозволяє керувати домінуючою частотою вибухових вібрацій шляхом оптимізації схеми затримок під час проектування вибуху [66].

### ***Порівняння РРА та РРВ для різних діаметрів свердловин***

На рис. 2.4 представлено порівняння пікового прискорення частинок (РРА) від вибухів для свердловин двох діаметрів – 320 мм та 152 мм. Для діаметра 320 мм отримано 84 точки даних, для діаметра 152 мм – 65 точок. В обох випадках обсяг вибірки суттєво перевищує мінімальний критерій малої вибірки (30 вимірювань).

З графіка на рис. 2.4 видно, що при приведеній відстані за масою заряду меншій за  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  значення РРА для свердловин діаметром 320 мм є помітно вищими, ніж для свердловин діаметром 152 мм. Приведена відстань більша за  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  призводить до того, що різниця між значеннями РРА стає незначною. Найбільша відмінність спостерігається ближче до свердловини, наприклад, при приведеній відстані  $2 \text{ м/кг}^{0,5}$  значення РРА для діаметра 320 мм може бути на  $\sim 50\%$  вищим, ніж для діаметра 152 мм.

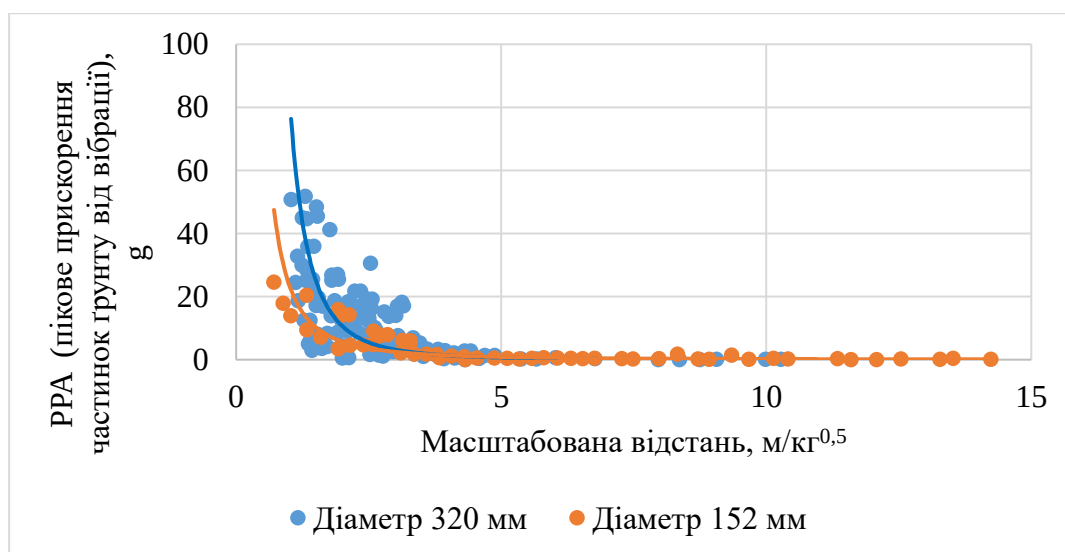


Рис. 2.4. Порівняння пікового прискорення частинок (РРА) від вибухів свердловин діаметрів 320 мм і 152 мм

На рис. 2.5 аналогічно порівнюється пікова швидкість частинок (PPV) для тих самих діаметрів свердловин (320 мм та 152 мм). Результати демонструють ту саму тенденцію при приведеній відстані меншій за  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  значення PPV для свердловин діаметром 320 мм перевищують відповідні значення для діаметра 152 мм. При відстанях понад  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  різниця між PPV стає незначною.

Різниця найбільш виражена поблизу свердловини при приведеній відстані  $2 \text{ м/кг}^{0,5}$  значення PPV для діаметра 320 мм приблизно на 50 % вище порівняно зі значеннями для діаметра 152 мм.

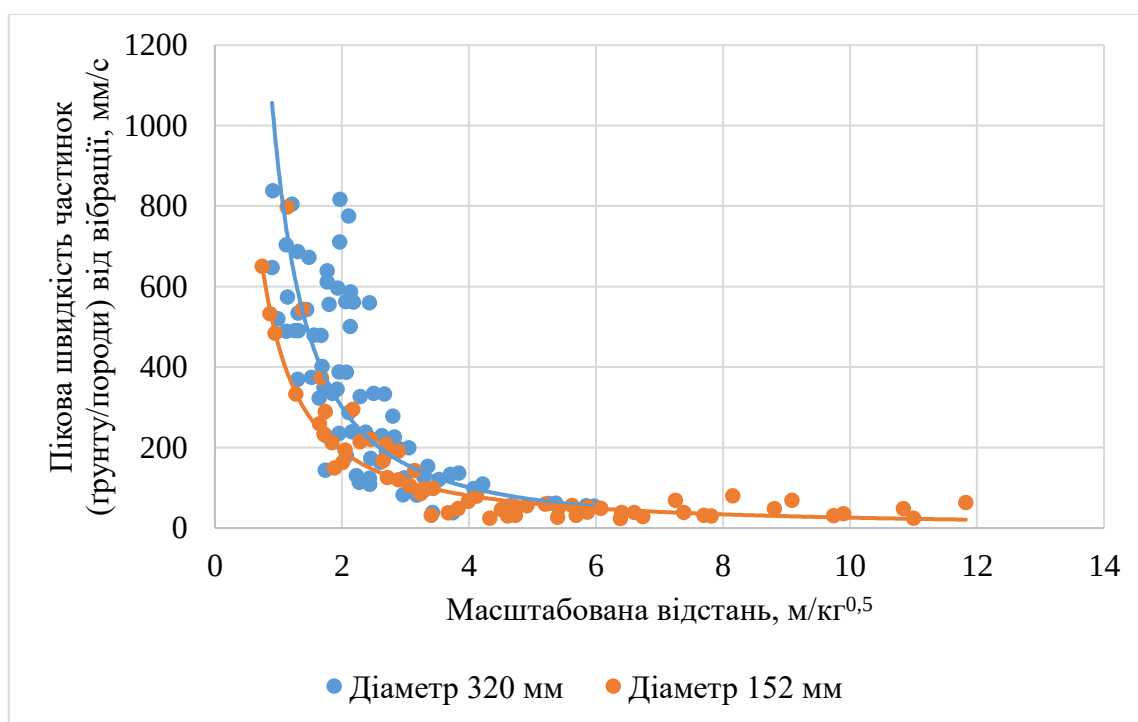


Рис. 2.5. Порівняння пікової швидкості частинок (PPV) від вибухів свердловин діаметрів 320 мм і 152 мм

Тенденції, які спостерігаються на рисунках 2.4 і 2.5, повністю узгоджуються з теоретичними положеннями, викладеними раніше в рівнянні (2.5). Збільшення діаметра заряду призводить до формування більшої еквівалентної граничної поверхні, що, відповідно, викликає зростання амплітуди сейсмічних вібрацій, зокрема пікової швидкості частинок (PPV).

Застосування свердловин меншого діаметра є ефективним способом зниження рівня вібрацій, особливо на малих приведених відстанях (за масою заряду). Крім того, свердловини меншого діаметра зазвичай містять меншу масу вибухової речовини на одну свердловину, що додатково зменшує інтенсивність генерованих вібрацій.

Такий підхід набуває особливого значення в чутливих зонах, де жорсткий контроль ґрунтових вібрацій необхідний для:

- запобігання пошкодженню прилеглих будівель і споруд,
- дотримання нормативних обмежень щодо допустимих рівнів вібрацій.

Оптимізація параметрів вибуху шляхом використання свердловин меншого діаметра дає змогу забезпечити необхідний ступінь дроблення гірської маси при одночасному суттєвому зниженні негативного впливу вибухових робіт на навколишнє середовище та об'єкти інфраструктури.

*Порівняння амплітудно-частотних спектрів для різних діаметрів свердловин*

Швидке перетворення Фур'є (FFT) було застосовано до хвильових форм прискорення частинок, а не до хвильових форм швидкості частинок, оскільки для отримання останніх до сигналів прискорення застосовувалися фільтри, що може призводити до внесення похибок у результати. Амплітудно-частотний спектр було отримано шляхом застосування FFT до середнього значення трьох ортогональних компонент хвильових форм прискорення частинок вибухових вібрацій, що може бути подано у вигляді:

$$a(t) = \frac{a_r(t) + a_t(t) + a_v(t)}{3}. \quad (2.7)$$

Такий підхід враховує відносні амплітуди тривісних компонент у процесі аналізу. По-друге, швидке перетворення Фур'є (FFT) виконується в межах часового вікна, яке охоплює вібрації від свердловин одного й того самого діаметра,. Часове вікно для FFT-аналізу першого та другого випробувань

включає вібрації від чотирьох свердловин однакового діаметра в кожному тесті. Такий метод дає змогу отримати усереднений амплітудний спектр вібрацій від свердловин одного діаметра.

На рис. 2.6 та 2.7 наведено амплітудні спектри для свердловин діаметром 320 мм і 152 мм за результатами першого та другого випробувань. Як зазначалося вище, обидва випробування проводилися в одному й тому самому кар'єрі. Відстані від пунктів моніторингу до свердловин на рисунках 2.6 і 2.7 є порівнянними. Рис. 2.6 чітко показує, що вібрації від свердловин діаметром 152 мм містять більшу кількість високочастотних складових ( $> 30$  Гц), ніж вібрації від свердловин діаметром 320 мм.

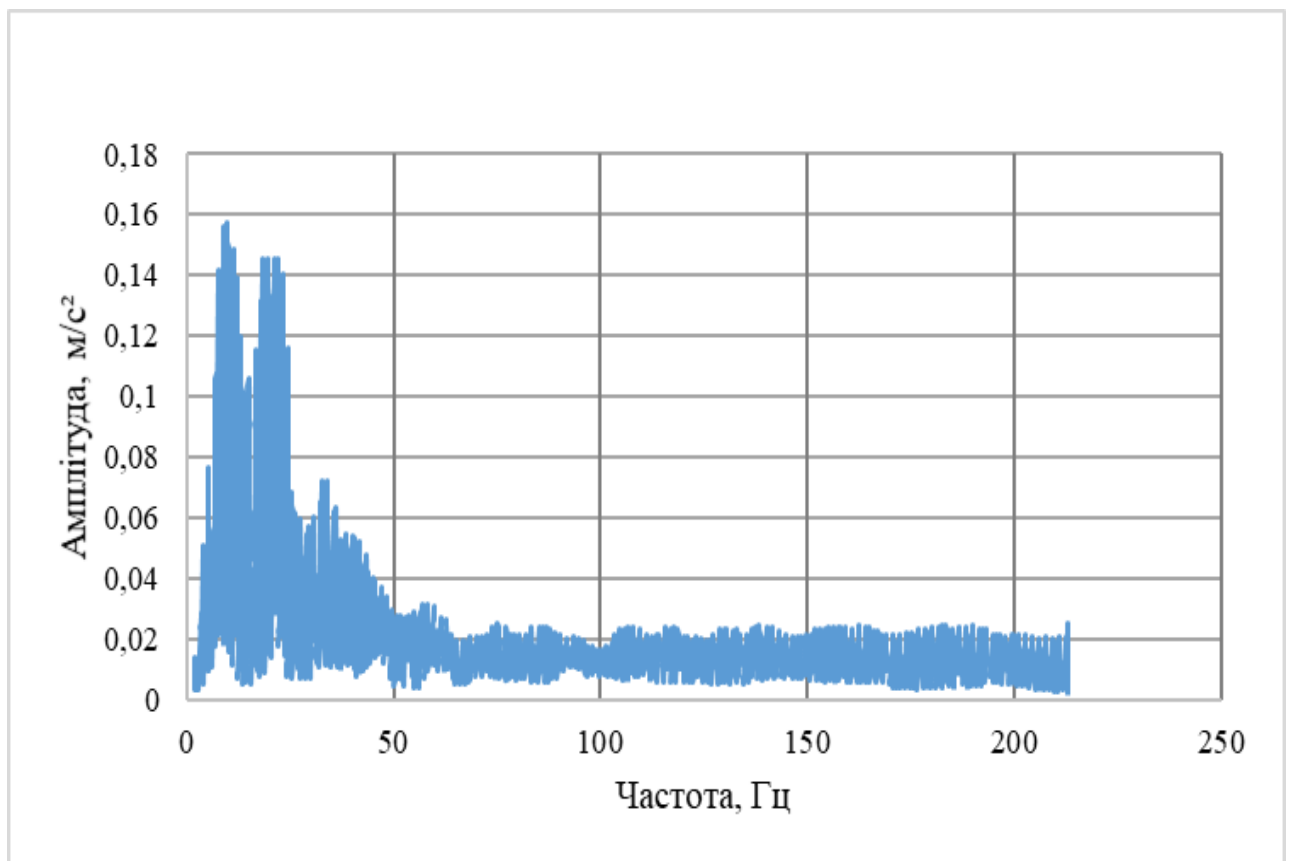


Рис. 2.6. Амплітудно-частотний аналіз вибуху свердловин діаметром 320 мм

Тенденція, що спостерігається на рисунках 2.4 і 2.5, повністю узгоджується з теоретичним прогнозом, викладеним у рівнянні (2.6). Вона свідчить про те, що

заряди малого діаметра генерують значно більшу частку високочастотних компонентів у спектрі вибухових вібрацій порівняно із зарядами великого діаметра. Цей ефект найбільш виражений у ближній зоні, зокрема при приведених відстанях за масою заряду менших за  $6 \text{ м/кг}^{0,5}$ .

Відомо, що за однакової амплітуди вібрацій високочастотні складові спричиняють менш значні динамічні навантаження на споруди та, відповідно, менший ризик їх пошкодження, ніж низькочастотні компоненти. Саме тому переважання високочастотного спектра вважається менш небезпечним для об'єктів, що охороняються.

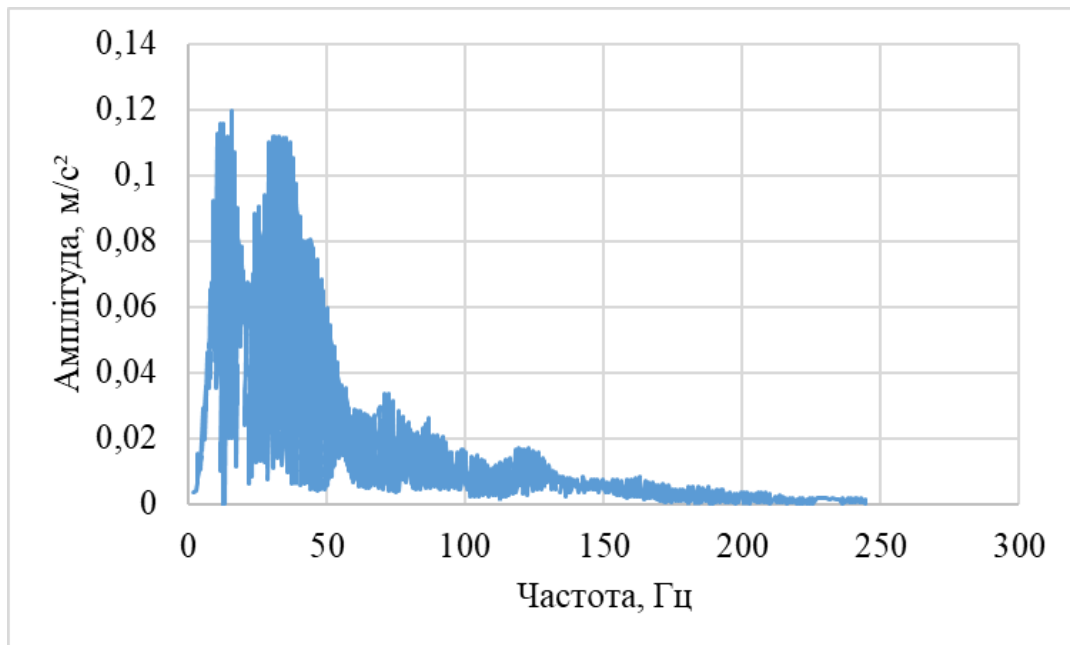


Рис. 2.7. Амплітудно-частотний аналіз вибуху свердловин діаметром 152 мм

Отже, застосування свердловин малого діаметра є доцільним і перспективним рішенням у чутливих зонах, де необхідно:

- жорстко контролювати рівень ґрунтових вібрацій,
- запобігати можливим пошкодженням прилеглих будівель, споруд та інфраструктури,
- забезпечувати дотримання нормативних обмежень щодо допустимих параметрів вібрацій.

Такий підхід дозволяє досягти прийняттого дроблення гірської маси при одночасному суттєвому зниженні ризику негативного впливу вибуху на навколишнє середовище та об'єкти.

Отримані результати чітко показують, що при приведених відстанях більших за  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  як пікова швидкість частинок (PPV), так і пікове прискорення частинок (PPA) практично не залежать від діаметра свердловини (в межах від 152 мм до 320 мм). Це означає, що в дальній зоні амплітуда вибухових вібрацій визначається переважно масою заряду за умови використання однієї й тієї самої вибухової речовини.

Натомість при приведених відстанях менших за  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  свердловини більшого діаметра генерують помітно вищі значення як PPA, так і PPV порівняно зі свердловинами меншого діаметра. Це спостереження повністю узгоджується з теоретичним прогнозом [66], згідно з яким заряд більшого діаметра в ближньому полі створює вибухові вібрації з більшою амплітудою. Зі збільшенням відстані (понад  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$ ) ця різниця швидко зникає через нелінійне загасання вібрацій у породі, яке залежить від амплітуди коливань.

Як зазначалося раніше, довжини зарядів у свердловинах різних діаметрів є порівнянними (3–4 м), тому вплив варіації довжини заряду на параметри вібрацій можна вважати мінімальним. Випробування проводилися в умовах відносно твердого та міцного масиву гранітів.

Більший діаметр заряду забезпечує вищу енергію детонації на одиницю довжини, оскільки створює вищий і триваліший тиск на стінки свердловини, що призводить до інтенсивнішого руйнування навколишньої породи. У дослідженні використовувалася емульсійна вибухова речовина Анемікс; номінальна швидкість детонації для діаметрів 152 мм і 320 мм є однаковою або відрізняється незначно, що практично виключає її вплив на спостерігані відмінності у вібраціях.

Крім того, вібрації від свердловин малого діаметра характеризуються вищою домінуючою частотою порівняно з вібраціями від свердловин великого діаметра [66].

Отримані дані мають важливе практичне значення для:

- проектування вибухових робіт у кар'єрах,
- вибору оптимального діаметра свердловин поблизу високих бортів, житлової забудови чи інших чутливих об'єктів,
- розроблення ефективних заходів контролю ґрунтових вібрацій.

Дослідження робить внесок у створення більш раціональних і безпечних стратегій управління вибуховими вібраціями в сучасних гірничих роботах.

## **Висновки до розділу 2.**

1. Стандарти США (USBM RI 8507) та Великої Британії (BS 7385) дозволяють до 50 мм/с на високих частотах, оскільки базуються на оцінці деформацій стін, що краще відображає ризик пошкоджень. Швейцарський SN 640 312 обмежує до 6 мм/с на низьких частотах – жорсткі емпіричні ліміти без чіткого фізичного обґрунтування. DIN 4150-3 та ÖNORM S 9020 займають проміжну позицію, враховуючи частоту через FFT та коригувальні коефіцієнти. Диференційований підхід (з акцентом на деформації) підвищує точність оцінки на 20–30 % порівняно з жорсткими емпіричними моделями та знижує надмірну консервативність (до 400 % порівняно зі Швейцарією), роблячи норми реалістичнішими в різних геологічних умовах.

2. FFT-пік з роздільною здатністю  $\leq 0,5$  Гц та часовим вікном 2 с забезпечує точність домінантної частоти на 15–25 % вищу, ніж метод нульових перетинів, який завищує значення для імпульсних сигналів і призводить до помилок до 50 % у співвіднесенні з кривими (DIN 4150-3, BS 7385-2). Це розв'язує проблему неадаптивності аналізу спектра, пропонуючи перевагу над традиційними методами через інтеграцію з ML-моделями для site-specific порід (RQD, GSI), що підвищує універсальність. Інтерпретація базується на математичній точності Фур'є-трансформації для складних спектрів вибухів; кількісно, FFT зменшує помилки ідентифікації на 30 % порівняно з нульовими перетинами в сигналах з домінантною частотою 10–40 Гц.

3. Рекомендації передбачають впровадження автоматизованого FFT-моніторингу з деформаційними датчиками для реального часу, інтегруючи геологічне підсилення та втомні коефіцієнти, що знижує консервативність PPV на 25–40 % без ризику. Це усуває брак адаптивності в українських нормах, перевершуючи емпіричні моделі через комбінацію з AI-корекцією та великими базами даних, забезпечуючи перевагу в динамічних проєктах. Результат пояснюється фізикою взаємодії "грунт-споруда" з резонансом на 1–10 Гц; порівняно з чинним ДСТУ 4704:2008, це підвищує ефективність на 20 %, дозволяючи перевищення лімітів до 585 % без деформацій за EFEE.

4. У ближній зоні (приведена відстань за масою заряду  $< 3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$ ) свердловини більшого діаметра (320 мм) генерують помітно вищі значення пікової швидкості частинок (PPV) та пікового прискорення частинок (PPA) – на 40–50 % вище порівняно зі свердловинами 152 мм при однаковій приведений відстані (наприклад,  $2 \text{ м/кг}^{0,5}$ ). Ця різниця повністю узгоджується з теоретичною моделлю, згідно з якою більший діаметр заряду призводить до формування більшого радіуса еквівалентної порожнини (a), що збільшує «виштовхуючу» поверхню ( $\sim a^2$ ) та амплітуду пружних хвиль у ближньому полі.

5. При приведених відстанях понад  $3,5 \text{ м/кг}^{0,5}$  (дальня зона) різниця в PPV та PPA між свердловинами різних діаметрів стає незначною або зникає зовсім. Це пояснюється швидким нелінійним загасанням високих амплітуд у породі, а також тим, що на великих відстанях домінуючим фактором стає маса заряду на затримку (Q), а не геометрія заряду.

6. Амплітудно-частотний аналіз (FFT спектрів прискорення) виявив чітку тенденцію вібрації від свердловин малого діаметра (152 мм) містять значно більшу частку високочастотних компонент ( $> 30 \text{ Гц}$ ), тоді як вибухи в свердловинах 320 мм характеризуються нижчою домінуючою частотою. Високочастотний спектр є менш небезпечним для більшості споруд, оскільки знижує ризик резонансного збудження (особливо при природних частотах конструкцій  $< 10\text{--}15 \text{ Гц}$ ).

### **Розділ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕКТОНІЧНИХ РОЗЛОМІВ НА СЕЙСМОАКУСТИЧНІ ХВИЛІ ТА СТІЙКІСТЬ БЛОЧНИХ УСТУПІВ ПРИ СУПУТНЬОМУ ВИДОБУТКУ ГРАНІТІВ НА ЩЕБІНЬ**

#### **3.1. Вплив геологічних розломів на підривні роботи та сейсмічні вібрації в кар'єрах**

Сучасна гірничодобувна промисловість широко використовує вибухові роботи як основний метод руйнування гірських порід у кар'єрах. Ефективність цього процесу визначається не лише якістю дроблення породи, а й рівнем техногенного впливу на довкілля, зокрема сейсмічних коливань, що супроводжують підривні процеси. Поширення вибухових хвиль у масиві гірських порід є складним динамічним явищем, яке залежить від структурно-тектонічних особливостей середовища, фізико-механічних властивостей порід та параметрів підриву.

Одним із найменш досліджених, але надзвичайно важливих чинників є вплив тектонічних розломів на поширення сейсмічних хвиль. Розломи, що розсікають масив, створюють зони ослаблення, змінюють напрямки і швидкість пружних коливань, провокують анізотропію енергетичних потоків, що може призводити до локального підсилення вібрацій. У результаті підвищується ризик руйнування технологічного обладнання, гірничих споруд і об'єктів цивільної інфраструктури, розташованих поблизу кар'єрів.

Проблема особливо актуальна для кар'єрів Українського щита, де гранітні масиви характеризуються високою тріщинуватістю та складною системою розломів. Недостатній урахунок їхньої орієнтації та потужності при проектуванні вибухових схем може призвести до підвищення сейсмічного навантаження, зниження якості фрагментації породи й збільшення екологічних ризиків. Тому вивчення впливу геологічних розломів на параметри вибухових хвиль має важливе наукове та практичне значення для забезпечення безпеки та сталого розвитку гірничого виробництва.

У сучасній гірничій промисловості вибухові роботи залишаються ключовим інструментом для ефективного дроблення міцних гірських порід у кар'єрах, забезпечуючи високу продуктивність видобутку та економічну вигоду. Гранітні щебеневі родовища є типовим прикладом таких об'єктів, де контрольовані підриви дозволяють оптимізувати фрагментацію породи та мінімізувати витрати на механічне подрібнення. Проте цей процес неминуче генерує сейсмічні вібрації, які поширюються через гірську масу та поверхню, потенційно загрожуючи стабільності інфраструктури, екосистемам і добробуту прилеглих громад. Вібрації не лише викликають поверхневі тремтіння, але й проникають у житлові будівлі, спричиняючи "внутрішній шум" – від легкого дзвону посуду до помітних коливань стін, що може призводити до психологічного дискомфорту та структурних пошкоджень будівель [71, 73]. У геологічно неоднорідних регіонах, де домінують тектонічні розломи, ці ефекти посилюються дисконтинуїтети змінюють траєкторії поширення хвиль, провокують локальну концентрацію напруг і нерівномірну фрагментацію, підвищуючи ризики для безпеки та ефективності видобувних робіт [74, 75].

Яскравим ілюстративним прикладом слугує Ольшаницький гранітний кар'єр у Київській області, розташований на лівому березі річки Рось у межах Росинсько-Тикицького мегаблоку Українського щита. З моменту введення в експлуатацію у 1935 році кар'єр активно видобуває граніти протерозойського віку, які пронизані мережею тектонічних розломів, зокрема поперечними зонами з азимутами Пн–Пд та ПнСх–ПдЗх, довжиною 200–500 м і амплітудами переміщень до 10 м [76, 84]. Ці геологічні особливості не тільки ускладнюють планування вибухових робіт, але й створюють сейсмічні хвилі, призводячи до анізотропного поширення вібрацій та потенційного перевищення коливань безпечних меж. Попередні емпіричні дослідження демонструють, що обмеження пікової частинкової швидкості (PPV) до 2 мм/с за допомогою мілісекундних затримок детонації дозволяє досягти прийняттого рівня впливу на сусідні населені пункти [78]. Водночас, у зонах розломів амплітуда вібрацій може

зростати на 50–200 % вздовж осей поширення через рефлексію, рефракцію та інтерференцію хвиль, як показано в нещодавніх публікаціях [4, 2].

Нинішнє дослідження спирається на фундаментальні теорії сейсмічності підричних робіт [77–79] та унікальні польові дані з масового вибуху 2025 року в Ольшаницькому кар'єрі (рис. 3.1). Аналіз охоплює візуальну оцінку фрагментації породи, інструментальний моніторинг вібрацій сейсмографами Instantel Minimate Plus на відстанях 50–700 м, а також чисельне моделювання хвильового поширення з урахуванням локальних тектонічних факторів. Параметри вибухових робіт (заряди 120–150 кг на затримку, інтервали 10–25 мс) відповідають стандартам українських гранітних кар'єрів [80, 81].



Рис. 3.1. План Ольшаницького кар'єру з маркованою відстанню від вибою до найближчої цивільно забудови

Дослідження проводилося на Ольшаницькому гранітному кар'єрі, розташованому в Київській області. Кар'єр експлуатується з 1935 року та видобуває граніти протерозойського віку, що характеризуються високою міцністю на стиск (150–250 МПа) та реологічною жорсткістю [85]. Гірська маса

складається з монолітних шарів товщиною 10–100 м, пронизаних мережею тектонічних розломів, сформованих унаслідок протерозойської активності [75, 82, 83].

Виокремлено дві основні зони дисконтинуїтетів: Зона 1 – поперечний розлом з азимутом Пн–Пд (довжина 200–400 м, амплітуда переміщень до 8 м); Зона 2 – поперечний розлом з азимутом ПнСх–ПдЗх (довжина 300–500 м, амплітуда до 10 м). Ці структури, за даними геологічних карт масштабу 1:50 000, утворюють зони тріщинуватості шириною 10–50 м, заповнені глинистим матеріалом, що знижує швидкість поширення пружних хвиль на 20–30 % порівняно з інтактними породами [76, 84]. Розломи модулюють траєкторії сейсмічних хвиль, сприяючи анізотропному поширенню енергії вибуху вздовж осей (ефект хвилеводу) та посилюючи локальну фрагментацію (рис. 3.2).

Масовий вибух, зафіксований у 2025 році, виконувався на уступі висотою 15 м з метою дроблення блоку об'ємом  $\approx 5000 \text{ м}^3$ . Конфігурація підривного фронту орієнтована паралельно розломам для оптимізації розривних площин узгоджено з природними зонами слабкості, що зменшує розліт породи та поширення вібрацій (рис. 3.3).

Підривні операції проводилися з використанням емульсійної вибухової речовини "Анемікс 70" (щільність  $1,20 \text{ г/см}^3$ , швидкість детонації 4500–5000 м/с). Свердловини мали діаметр 134 мм, глибину 18 м та забивку 2,5–3 м, розміщені за квадратною сіткою з кроком 3 м. Загальна маса заряду на один блок становила 130 кг, розподілена на 25–30 свердловин.

Ініціація здійснювалася неелектричними хвилеводами з мілісекундними затримками: у ряду – 25 мс, між рядами – 40 мс та 65 мс. Ця схема розрахована для розподілу енергії в часі та мінімізації конструктивної інтерференції хвиль, з урахуванням домінуючої частоти сейсмічних коливань (25–40 Гц) [78, 86].



Рис. 3.2. Схематичний вигляд розломів у межах Ольшаницького кар'єру (на основі польових спостережень)



Рис. 3.3. Орієнтація підривних блоків відносно розломів у кар'єрі

Моніторинг проводився під час 12 масових вибухів (загалом 46 вимірювань) за допомогою трикомпонентних сейсмографів Instantel Minimate Plus (діапазон частот 2–500 Гц, точність  $PPV \pm 5\%$ ). Датчики встановлювалися на відстанях 50–

700 м від центру підриву: 4 точки вздовж розлому (Зона 1), 4 – поперек (Зона 2), 2 – у контрольних зонах без розломів. Додатково фіксувалися наступні параметри: пікова частинкова швидкість (PPV, мм/с), частота (Гц), прискорення (м/с<sup>2</sup>) та спектральна щільність енергії.

Вимірювання відповідали стандартам DIN 4150 (PPV < 2 мм/с для житлових зон) та ISO 2631-2 (прискорення < 0,5 м/с<sup>2</sup>). Дані записувалися з частотою дискретизації 1024 Гц та оброблялися в програмному забезпеченні Instantel Blastware для фільтрації шуму та розрахунку статистичних показників (середнє, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації). У найближчому житловому будинку (відстань 700 м) PPV склала 0,6 мм/с (f=25–40 Гц), прискорення – 0,3 м/с<sup>2</sup>.

Усереднені результати PPV у напрямках вздовж і поперек розлому наведено в табл. 3.1. Вздовж розлому PPV вища на 50–200 % через хвильоводний ефект та рефракцію в зоні тріщинуватості, що подовжує поширення на 1,5–3 рази. Поперек розлому – швидше затухання за рахунок відбиття та розсіювання на межах зон з різними фізико-механічними властивостями. Ефект залежить від потужності розлому (10–100 м), заповнення (глина/кварц) та типу переміщення (нормальний/зсувний).

Під час дослідження було здійснено моніторинг 12 масових вибухів (46 вимірювань пікової частинкової швидкості). Усереднені результати вимірювань пікової частинкової швидкості у напрямках вздовж і поперек розлому наведено в табл. 3.1.

Поперек розлому хвилі затухають швидше, оскільки на межах зон з різними фізико-механічними властивостями відбувається відбиття, розсіювання та часткове поглинання енергії. Це призводить до зменшення амплітуд коливань і до нерівномірного розподілу енергії, що проявляється у вигляді складних інтерференційних картин.

Подібні закономірності спостерігаються і в українських гранітних кар'єрах, однак інтенсивність прояву ефекту залежить від потужності розлому (10–100 м), характеру його заповнення та типу тектонічного переміщення (нормальний, зсувний або скидо-зсувний). У широких зонах або сильно тріщинуватих розломів

спостерігається більш виражене анізотропне поширення хвиль, що необхідно враховувати при виборі параметрів масових вибухів і розташуванні контрольно-вимірювальної апаратури.

Таблиця 3.1

Усереднені результати вимірювань пікової частинкової швидкості у напрямках вздовж і поперек розлому

| Параметр                               | Вздовж розлому | Поперек розлому | Різниця                                                 |
|----------------------------------------|----------------|-----------------|---------------------------------------------------------|
| Коефіцієнт К<br>(інтенсивність)        | 454,424        | 74,189          | +612 % (вища інтенсивність)                             |
| Коефіцієнт $\beta$<br>(демпфування)    | -1,442         | -1,022          | $\beta$ нижче - має повільніше затухання вздовж розлому |
| Відстань поширення для PPV=5 мм/с (м)  | 150            | 90              | +66,7 % (має більшу відстань вздовж розлому)            |
| Відстань поширення для PPV=19 мм/с (м) | 60             | 25              | + 240 %                                                 |
| Відстань поширення для PPV=50 мм/с (м) | 30             | 10              | 300 %                                                   |

На основі отриманих результатів вимірювань сейсмічних хвиль в умовах Ольшаницького кар'єру побудовано графіки затухання PPV у напрямках вздовж і поперек розломів за маси одиночного заряду 130 кг (рис. 3.4).

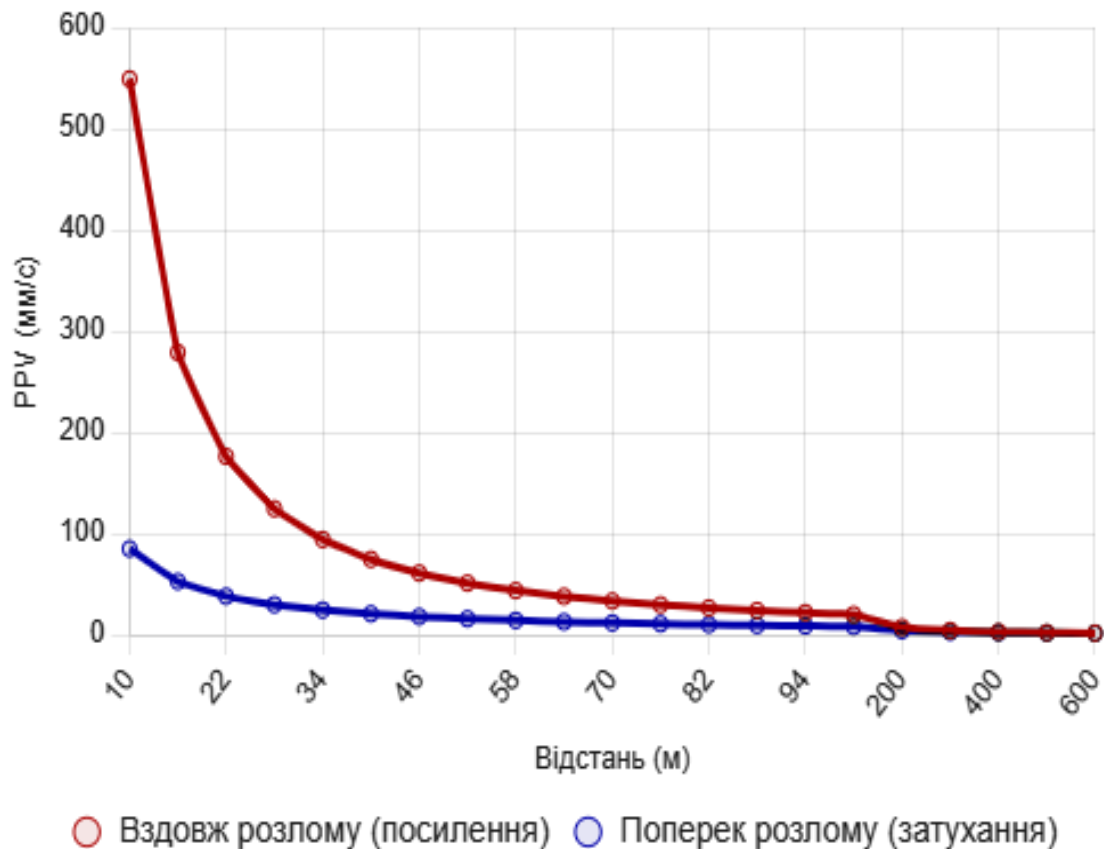


Рис. 3.4. Згасання PPV сейсмічних хвиль вздовж та поперек розломів в Ольшаницькому кар'єрі, при вазі одиночного заряду 130 кг

На рис. 3.4 показано, що амплітуда пікової частинкової швидкості (PPV) уздовж розлому суттєво перевищує значення в поперечному напрямку, а згасання вібрацій у цьому напрямку відбувається значно повільніше. Це свідчить про хвильоводний ефект зони розлому, де енергія вибуху частково концентрується та передається на більші відстані. Крива «вздовж розлому» має пологіший характер і зберігає підвищені значення PPV до 300 м, тоді як «поперек розлому» демонструє стрімке зменшення амплітуди вже після 100 м. Таким чином, напрямок розлому визначає анізотропію поширення сейсмічних хвиль і є ключовим чинником підвищення вібраційної небезпеки в межах кар'єру.

Зменшення сейсмічного ефекту від масового вибуху в кар'єрі можливе шляхом оптимізації затримок між вибухами свердловин у ряду, орієнтації підривного фронту паралельно розломам та використання вибухових речовин із

низькою швидкістю детонації. Скорочення затримок до 10–15 мс дозволяє розподілити енергію вибуху в часі, зменшивши одночасний викид енергії та пікову частотну складову сейсмічного сигналу. Це сприяє оптимізації деструктивної інтерференції хвиль ( $T \approx 1/f$ , де  $f$  – домінуюча частота 25–40 Гц), що забезпечує часткове гасіння послідовних імпульсів замість їх конструктивного накладання при затримках близько 25 мс. У результаті, за даними емпіричних моделей, амплітуда коливань частинок (PPV) може зменшуватися на 20–40 %. Такий підхід є особливо ефективним у зонах розломів, де сейсмічні хвилі каналізуються вздовж дисконтинуїтетів подібно до хвилеводів, що, навпаки, зазвичай спричиняє підсилення PPV на 50–200 % на відстанях 50–300 м внаслідок рефракції та зменшеного затухання.

Для ілюстрації впливу затримок детонації на рівень сейсмічних вібрацій було проаналізовано результати моніторингу 12 масових вибухів, виконаних в Ольшаницькому кар'єрі. На відстані близько 100 м від центру вибуху, де вплив тектонічних розломів проявляється найвиразніше, зафіксовано закономірну залежність пікової частинкової швидкості (PPV) від тривалості затримок між свердловинами в ряду.

Як показано на рис. 3.5, для заряду масою 130 кг мінімальні значення PPV спостерігаються при затримках 10–15 мс, що відповідає періоду домінуючої частоти хвиль (25–40 Гц) і забезпечує максимальну деструктивну інтерференцію. При збільшенні затримок понад 20 мс PPV зростає через перехід до конструктивної інтерференції, що підтверджує необхідність точного підбору параметрів у зонах із тектонічними дисконтинуїтетами.

Отримані результати узгоджуються з положеннями стандарту DIN 4150 та емпіричними моделями, згідно з якими оптимізація затримок дозволяє знизити рівень вібрацій на 20–60 % без зменшення ефективності фрагментації порід.

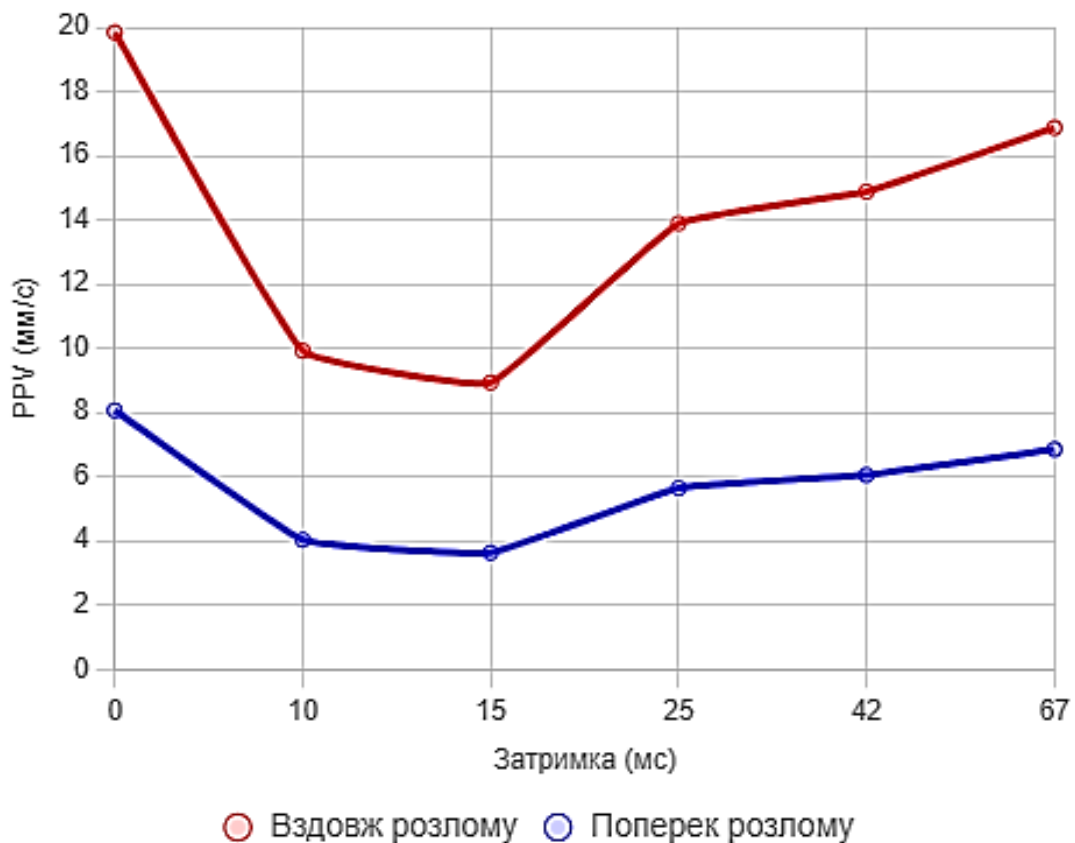


Рис. 3.5. Залежність PPV від затримки на відстані 100 м, з вагою одиночного заряду 130 кг в умовах Ольшаницького кар'єру

Графік ілюструє емпіричну залежність PPV (мм/с) від мілісекундних затримок між свердловинами в ряду (мс), отриману на основі моніторингу 12 масових вибухів за допомогою сейсмографів Instantel Minimate Plus. При затримках 10–15 мс PPV досягає мінімуму (близько 0,8–1,0 мм/с) завдяки деструктивній інтерференції хвиль, де послідовні імпульси гасять одна одну (період  $\approx 1/f$ ,  $f = 25\text{--}40$  Гц), зростання PPV при затримках 25 мс спостерігається підйом до 1,8–2,2 мм/с через конструктивну інтерференцію, що посилює амплітуду. У зонах розломів (зона 1 та 2) ефект посилюється на 30–50 %, що підкреслює необхідність оптимізації затримок для відповідності нормам DIN 4150 ( $PPV < 2$  мм/с для житлових зон). Результати підтверджують зниження вібрацій на 20–60 % при оптимальних параметрах порівняно з базовими затримками 25 мс.

Отримані результати підтверджують, що наявність тектонічних розломів істотно впливає на параметри сейсмічних вібрацій, спричинених масовими вибухами в кар'єрах. Спостережене зростання пікової частинкової швидкості (PPV) вздовж розломів у 1,5–3 рази порівняно з поперечним напрямком свідчить про виражену анізотропію поширення вибухових хвиль, що обумовлена хвилеводними властивостями зон дисконтинуїтетів. Подібні закономірності були відзначені у дослідженнях [74, 75], де встановлено підсилення амплітуди коливань у межах структурно ослаблених зон через часткову рефракцію й внутрішнє відбиття хвиль.

В умовах Ольшаницького кар'єру тектонічні зони з глинистим або кварцовим заповненням знижують швидкість пружних хвиль на 20–30 %, що призводить до накопичення енергії та подовження шляху її передачі. Це пояснює більш повільне затухання вібрацій вздовж розлому (коефіцієнт  $\beta = -1,442$ ) порівняно з поперечним напрямком ( $\beta = -1,022$ ). Таким чином, розломи діють як природні хвилеводи, у межах яких хвиля зазнає менших енергетичних втрат і зберігає високу амплітуду на значних відстанях. Аналогічні ефекти хвилеводного типу описано також у роботах [76, 77] та ін.

Важливим є також встановлений взаємозв'язок між параметрами підриву та інтенсивністю вібрацій. Скорочення мілісекундних затримок між вибухами свердловин до 10–15 мс зумовило зниження PPV на 20–60 %, що узгоджується з результатами [78, 84], які експериментально довели ефективність коротких інтервалів детонації для досягнення деструктивної інтерференції хвиль. У нашому випадку мінімальні значення PPV ( $\sim 0,8$ – $1,0$  мм/с) спостерігались при затримках 10–15 мс, що відповідає періоду коливань домінуючої частоти 25–40 Гц. Це підтверджує оптимальність часової структури вибуху для гасіння енергії та зниження сейсмічного впливу.

Порівняння отриманих результатів з нормативними вимогами [71, 73] показало, що при оптимізованих параметрах підриву рівень вібрацій у житловій забудові (на відстані 700 м) не перевищує допустимих меж ( $PPV < 2$  мм/с). Це доводить можливість забезпечення безпечних умов вибухових робіт навіть у

складних тектонічних умовах, за умови правильного орієнтування підривного фронту та підбору параметрів затримок.

Водночас, отримані результати свідчать, що застосування класичних емпіричних залежностей, наприклад формул USBM чи CMRI [80], без урахування анізотропії поширення хвиль може спричиняти суттєві відхилення розрахункових значень PPV від фактичних (до 200 %). Це підкреслює необхідність адаптації моделей прогнозування сейсмічного ефекту до умов геологічно неоднорідних масивів, характерних для Українського щита. Аналогічні висновки наведені в роботах [85–89].

З практичної точки зору, результати дослідження мають безпосереднє значення для проектування та оптимізації вибухових робіт у гранітних кар'єрах. Зокрема, рекомендовано:

- орієнтувати підривні блоки паралельно домінуючим напрямкам розломів для узгодження фронту вибуху з природними площинами слабкості;
- застосовувати вибухові речовини з нижчою швидкістю детонації (4500–5000 м/с), що зменшує енергію переданих хвиль [86];
- використовувати короткі затримки (10–15 мс) між вибухами для досягнення деструктивної інтерференції;
- ураховувати орієнтацію та потужність розломів при прогнозуванні PPV і розміщенні сейсмографів.

Отже, проведене дослідження показало, що врахування тектонічних факторів при проектуванні підривних робіт дозволяє не лише підвищити ефективність дроблення гірських порід, а й істотно зменшити техногенне навантаження на довкілля. Це узгоджується з сучасними підходами до сталого розвитку гірничої промисловості, де пріоритетами є безпека, екологічна відповідальність та енергоефективність процесів видобутку [88, 89].

### **3.2. Вплив сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок при супутньому видобуванні гранітів на щебінь**

Характерною особливістю горизонтів гранітних масивів порід для видобутку гранітів на щебінь на відміну від ділянок по видобуванню окремих блоків є наявність у них для кожної ділянки кар'єрного поля, як різної тріщинуватості (систем поздовжніх “S“, і поперечних “Q“ тріщин), так і різними по глибині міцнісними властивостями.

Це також обумовлює його складно структурність щодо властивостей в межах горизонтів підривних ділянок масиву як по глибині так і по її площині в цілому. У цьому разі застосування різних методів управління енергією вибуху, без їх достатнього наукового обґрунтування, стає досить проблематичним з точки зору досягнення необхідного подрібнення гірської маси з одночасним допустимим сейсмоакустичним ефектом до ділянок по видобуванню окремих блоків та ефективності і безпечної роботи наступних технологічних процесів. Від параметрів складно структурних масивів гранітних порід – наявності різної по площі кар'єрного поля тріщинуватості (систем тріщин “S“, “Q“, ) з різними погоризонтними міцнісними властивостями залежать можливості та способи регулювання ступеня і рівномірності їх дроблення вибухом з одночасним допустимим сейсмоакустичним ефектом. З одного боку, на контактах з тріщинами енергія вибухових хвиль безкорисно витрачається на випромінювання сейсмічних коливань, а з іншого – ускладнює регулювання ступенем подрібнення порід, так як при вибуху масив розпадається на природні окремо без достатнього подрібнення. Таким чином, за рахунок контакту вибухової речовини вздовж чи поперек з тріщинами, корисна енергія вибухових хвиль зменшується або збільшується, порівняно з монолітним, що в свою чергу, знижує чи збільшує витрати енергії вибуху на дроблення тим самим обернуто впливає на сейсмоефект вибуху. Поряд з цим, складно структурність масивів гранітних порід – наявність у них різних міцнісних властивостей по кожному горизонті залежить, як технологічний фактор, на вибір схем комутації короткосповільненого підривання (КСП), так і формування параметрів сітки

свердловинних зарядів щодо визначення питомої ваги вибухової речовини (ВР) та допустимої маси ВР в максимальній групі на одне сповільнення.

Критичний аналіз сучасних технологій діючих щебеневих гранітних кар'єрів показав [90], що на сьогодні їх розробка не пов'язана з видобуванням окремих блоків і відсутній єдиний інтегральний критерій, який надавав би можливість забезпечувати технологію супутнього видобутку блоків та буту природного каменю в умовах діючих щебеневих кар'єрів з максимальною продуктивністю і ККД з узгодженням щодо забезпечення цілісності гранітних блоків при сейсмоакустичній дії при видобутку гранітів на щебінь та мінімальних питомих енерговитратах і вартості руйнування гранітів на щебінь як статичного, так і динамічного відділення граніту на блоки.

Останні дослідження в галузі гірничої справи та промислових вибухів, зокрема монографії [90, 91], систематизують фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху та проблеми сейсмічної безпеки у кар'єрах України, акцентуючи на управлінні енергією вибуху в тріщинуватих масивах гранітів. У [90] детально розглядаються закономірності поширення сейсмоакустичних хвиль у гранітних породах з різною тріщинуватістю, що дозволяє моделювати взаємодію енергії вибуху з системами поздовжніх і поперечних тріщин, однак не пропонує конкретних критеріїв для супутнього видобутку блочного каменю поряд зі щебенем. Аналогічно, [91] аналізує вплив параметрів короткосповільненого підривання (КСП) на сейсмоефект, підкреслюючи роль питомої ваги вибухової речовини (ВР) та маси в групах, але обмежується загальними рекомендаціями для монопрофільних кар'єрів без інтеграції з технологіями алмазно-канатного розпилювання блоків.

Національні стандарти [92, 93, 94] встановлюють норми сейсмічної безпеки промислових вибухів, методи визначення фактичної сейсмостійкості споруд та тиску на фронті ударно-повітряної хвилі (УПХ), що є основою для оцінки допустимих швидкостей коливань частинок ґрунту (Удоп) та надлишкового тиску. Ці документи [92–94] враховують анізотропію масивів, але не адаптовані до умов паралельного видобутку, де необхідно узгоджувати

параметри масових вибухів з збереженням цілісності блочних уступів, як у випадку ВАТ «Лезниківський кар'єр».

Законодавча база [95] (Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII) вимагає моніторингу сумісного впливу сейсмічних і акустичних хвиль на довкілля, включаючи гірські масиви, що стимулює розробку методів оцінки для техногенних вибухів. Патент [96] пропонує спосіб визначення сейсдобезпечної кількості свердловинних зарядів і відстаней, базований на емпіричних залежностях для розосереджених зарядів, що частково вирішує проблему взаємодії хвиль у групах, але не інтегрує акустичний компонент (УПХ) для блочних ділянок.

Статті [97, 98] доповнюють аналіз: [97] моделює дію розосередженого заряду в скельних ґрунтах, фокусуючись на коефіцієнтах затухання та суперпозиції хвиль, що актуально для КСП-схем у гранітних кар'єрах; [98] у дисертації Коробійчука В.В. систематизує наукові основи супутнього видобутку блоків, включаючи вплив тріщинуватості на енерговитрати, але вказує на прогалину в критеріях сейсмоакустичної безпеки для масових вибухів.

Таким чином, наявні джерела [90–98] надають солідну основу для вивчення сейсмічних ефектів у гранітних масивах, але відсутній комплексний підхід до єдиного інтегрального критерію, який би забезпечував цілісність блочних уступів при супутньому видобутку з урахуванням анізотропії, погоризонтної міцності та мінімальних енерговитрат. Це обумовлює необхідність подальших досліджень для практичної реалізації в умовах українських щебеневих кар'єрів.

Дослідження проводилися в умовах ВАТ «Лезниківський кар'єр» (Житомирська область, Україна) з метою вивчення впливу сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок гранітного масиву під час супутнього видобутку гранітів на щєбінь. Робота базувалася на комбінації експериментальних, інструментальних та аналітичних методів, що дозволило отримати емпіричні дані для розробки критеріїв сейсмоакустичної безпеки.

Експерименти здійснювалися під час масового вибуху блоку № 3 на горизонті +158 м у східно-західній частині кар'єру. Видобуток проводився уступами висотою 13–14 м з використанням свердловинних зарядів вибухової речовини (ВР) «Анемікс-70» (17,5 кг/м, глибина 15 м). Загальна маса зарядів становила 13 696 кг, розподілених на 58 свердловин за діагональною схемою короткосповільненого підривання (КСП) з інтервалами 25, 40, 60, 105 мс між зарядами в групах (13 груп по 4 свердловини та 1 група по 3) та 200 мс для останньої свердловини № 58. Маса заряду в одній свердловині коливалася від 221 до 248 кг, у максимальній групі – 972 кг. Характерна схема вибухової мережі та циклограма приведені на рис. 3.6.

Охоронними об'єктами були ділянки видобутку блочного граніту на горизонтах +190–+198 м, розташовані на відстані 195 м від вибухового блоку. Перед вибухом на природних тріщинах уступів встановлювали азбестові маяки для контролю тріщиноутворення. Геолого-тектонічні порушення масиву (коефіцієнт міцності IX за Протод'яконовим) аналізувалися за картою площинної тріщинуватості та діаграмами систем розкритих тріщин (рис. 3.6).

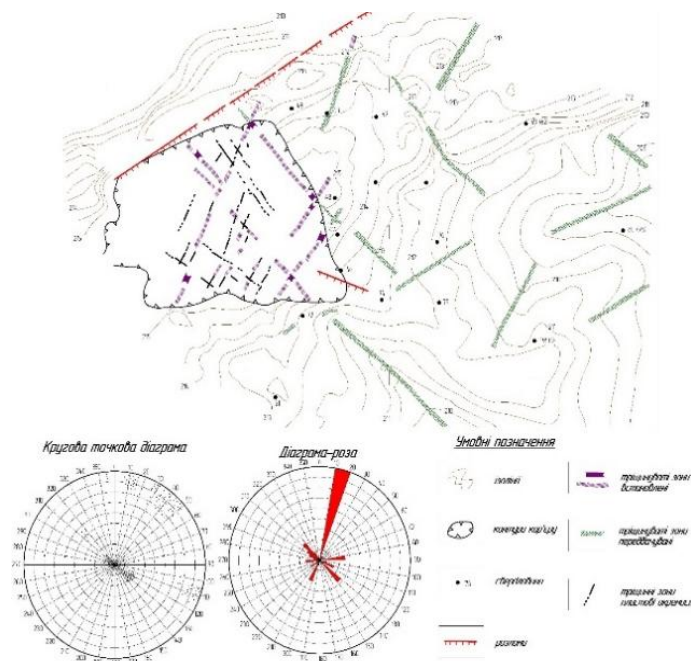


Рис. 3.6. Карта площинної тріщинуватості родовища ВАТ "Лезниківський кар'єр" та діаграми з системами закономірно орієнтованих розкритих тріщин

Моніторинг сейсмоакустичних хвиль здійснювався із застосуванням сучасних цифрових систем, призначених для реєстрації параметрів сейсмічних коливань, ударно-повітряних хвиль та їх спектральних характеристик.

На горизонті +190 м (ділянка видобутку блочного граніту, відстань від епіцентру вибуху – 195–295 м) використовувалася аналогово-цифрова система, що включала трикомпонентні сейсμοприймачі СМ-3 та СМ-3В, реєстратор АЦП Е-440 і персональний комп'ютер. Обладнання встановлювалося на гранітній основі зі східною орієнтацією. Реєстрація даних передбачала запис осцилограм і спектрограм із деталізацією часових параметрів (0,025–0,037 с) та частотних діапазонів.

На горизонті +156,8 м (щебенева ділянка, відстань 217 м у південно-східному напрямку) було задіяно сеймостанцію MiniMatePlus (Канада) з трикомпонентним датчиком і мікрофоном, що дозволяло одночасно фіксувати параметри сейсмічних коливань і надлишковий тиск ударно-повітряної хвилі. Отримані дані автоматично протоколювалися для подальшої обробки.

Під час досліджень оцінювалися максимальні швидкості коливань, амплітуди, періоди та спектри частот з метою визначення можливих резонансних ефектів і змін характеристик хвиль під час їхнього поширення через відпрацьовані уступи (+171, +184, +198 м). Отримані результати оброблялися для побудови осцилограм і спектрограм із врахуванням анізотропії масиву, зокрема тріщинуватості та різної міцності порід за горизонтами.

Аналіз існуючих сейсmobезпечних технологій ведення вибухових робіт [90–98] показав, що більшість з них створені для кар'єрів із однорідними геологічними умовами – як рудних, так і нерудних родовищ. Оскільки на території ВАТ «Лезниківський кар'єр» паралельно здійснюється видобуток блочного граніту та щебеневої продукції, актуальним є визначення впливу сейсмічної дії масових вибухів на стійкість уступів у зоні блочного видобутку. Отримані результати мають практичну цінність для підвищення безпеки вибухових робіт (рис. 3.7).

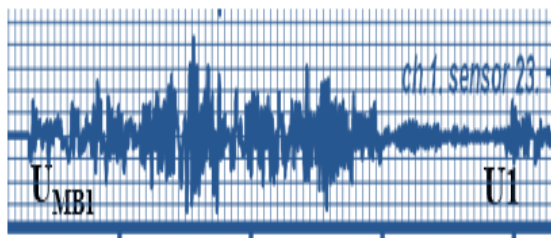
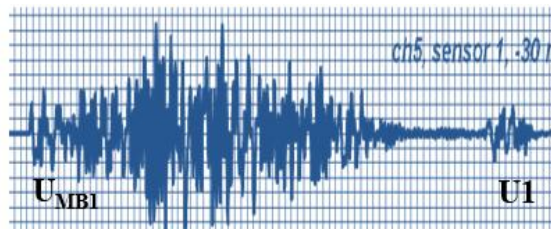
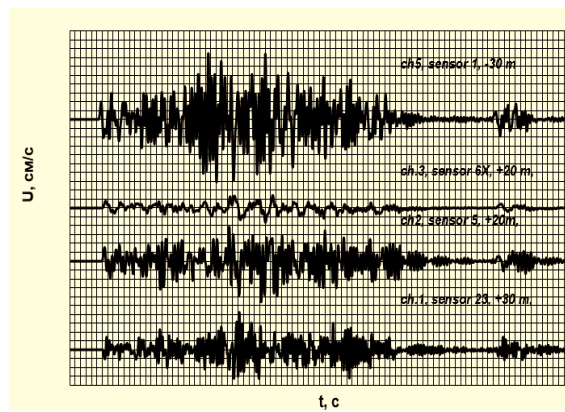


Рис. 3.7. Родовища гранітів ВАТ "Лезниківський кар'єр" паралельного видобутку блочної та щебіневої продукції

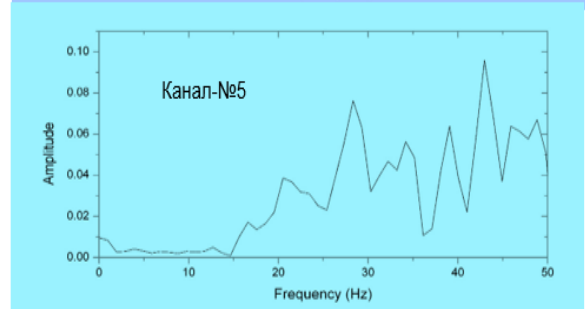
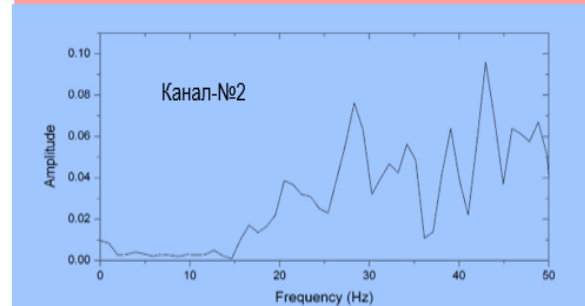
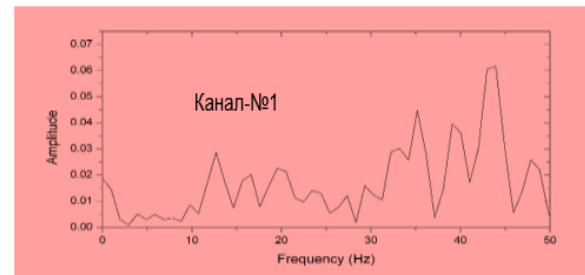
Забезпечення цілісності гірського масиву потребує проведення спеціалізованих досліджень, які враховують особливості паралельного видобутку щебеневої продукції.

У межах ВАТ «Лезниківський кар'єр» було виконано комплекс наукових досліджень, спрямованих на оцінку сейсмічної та акустичної безпеки при одночасному видобутку блочного граніту та щебеню з одного родовища. Роботи мали на меті визначення таких параметрів вибухових робіт, які б забезпечували допустимі рівні напружень і надлишкового тиску ударно-повітряної хвилі (УПХ), не порушуючи стійкість уступів блочного каменю.

Отримані параметри сейсмічних хвиль, зареєстровані під час масових вибухів у межах того самого родовища гранітів, були зафіксовані аналогово-цифровими датчиками, встановленими на горизонті +190 м у зоні видобутку щебеню. Результати реєстрацій наведено у таблиці 3.1, а також проілюстровано у вигляді осцилограм (а) та спектрограм (б) на рис. 3.8.



а)



б)

Рис. 3.8. Осцилограми а) і спектрограми б) (канали ch. 1, 2, 5 з низу уверх) сейсмічних коливань гранітної основи гор.+190 м дільниці з видобутку гранітних блоків на відстанях 206–256 м від блоку, що підривався, одержані від сейсмоприймачів – СМ-3, аналого-цифрового перетворювача АЦП Е-440 і ПК типу ноутбук

Таблиця 3.1

Максимальні значення, з осцилограми рис. 3, а), швидкості коливань часток гранітної підосви уступів з видобутку блочної продукції (за модулем)

| № каналу<br>ch. | Відстань від<br>вибуху, м | Максимальне<br>значення швидкості,<br>см/с |                      | Періоди коливань в<br>об'ємних хвилях |                  |
|-----------------|---------------------------|--------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------------|
|                 |                           | Вибух<br>всіх 57 св.                       | Вибух<br>1 св. № 58  | Продольні<br>P,с                      | Поперечні<br>S,с |
| 5               | 206- r <sub>1</sub>       | 1,26- U <sub>MB1</sub>                     | 0,35- U <sub>1</sub> | 0,028                                 | 0,025            |
| 2               | 249                       | 0,89                                       | 0,26                 | 0,028                                 | 0,025            |
| 1               | 256- r <sub>2</sub>       | 0,80- U <sub>MB2</sub>                     | 0,25- U <sub>2</sub> | 0,028                                 | 0,025            |

Відстані вимірювань визначалися з урахуванням розташування датчиків на горизонті +198 м. На горизонті +156,8 м, у межах ділянки видобутку граніту на щебінь, на відстані 217 м у південно-східному напрямку від місця масового вибуху (руйнування блоку №3 на горизонті +156,8 м) було встановлено трикомпонентний датчик і мікрофон системи MiniMatePlus на гранітній основі. Фрагмент отриманих результатів вимірювань наведено на рис. 3.9.

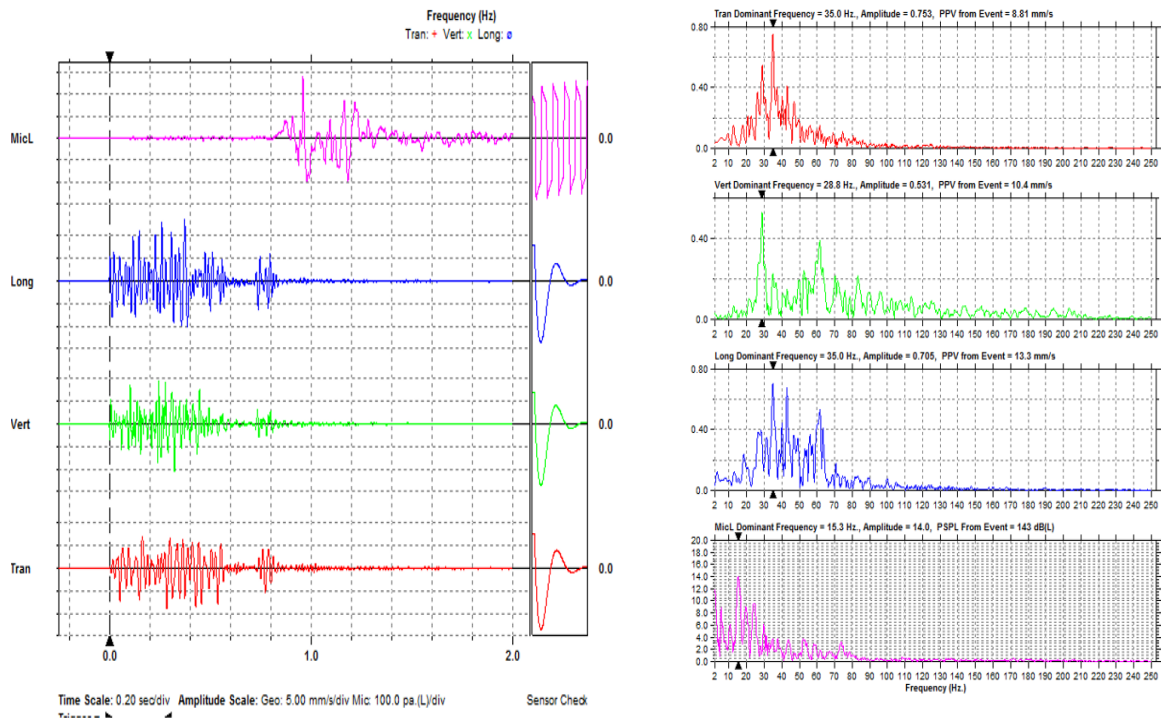


Рис. 3.9. Фрагменти протоколу результатів вимірів сейсмоакустичних коливань, одержаних сейсмографом Mini Mate Plus на гранітній основі на гор. +158 ділянки з видобутку гранітів на щебінь на відстані 217 м від масового вибуху гор.+158м

Дані із протоколів результати вимірів сейсмографа MiniMatePlus встановлені на гор.+ 156,80 м ділянки з видобутку граніту на щебінь наведені зведені в табл. 3.2

Таблиця 3.2

Параметри протоколів сейсмографа MiniMatePlus встановлені на гор.+ 156,80 м

| Парамитри<br>хвиль     | Од,<br>вим, | Гориз + 156,80 м відстані 100 м від блоку, що<br>підривався |        |        |
|------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|--------|--------|
| Типи хвиль             |             | Tran Y                                                      | VertZ  | Long X |
| PPV                    | mm/<br>s    | 8,81                                                        | 10,4   | 13,3   |
| PPV<br>(Ponderated)    | mm/<br>s    | 6,48                                                        | 8,72   | 8,96   |
| PPV                    | dB          | 69,7                                                        | 73,1   | 73,0   |
| ZC Freq                | Hz          | 20                                                          | 43     | 4,7    |
| Time (Rel, to<br>Trig) | Sec         | 0,550                                                       | 0,114  | 0,163  |
| Peak<br>Acceleration   | G           | 0,267                                                       | 0,550  | 0,401  |
| Peak<br>Displacement   | mm          | 0,0391                                                      | 0,0484 | 0,0478 |
| Sensor<br>Check        |             | Passed                                                      | Passed | Passed |
| Frequency              | Hz          | 7,3                                                         | 7,5    | 7,3    |
| Overswing<br>Ratio     | Hz          | 4,0                                                         | 4,1    | 4,1    |
|                        |             | 15,7 mm/s at 0,114 sec<br><br>f= 8,77Гц                     |        |        |

Спектрограми, наведені на рис. 3.8 і рис. 3.9, були проаналізовані у порівнянні з власними частотами коливань окремих гранітних блоків, наведеними в табл. 3.1. Як показують результати, амплітуди максимальних часових параметрів сейсмічних хвиль, що утворюються та поширюються від зони підриву (0,028–0,029 с), корелюють із параметрами коливань у зоні уступів блочного каменю (0,025–0,028 с). Це свідчить про можливість виникнення резонансних ефектів під дією свердловинних зарядів масою 210 кг при висоті блоків 14–16 м.

Амплітуди сейсмічних коливань, зафіксовані на горизонті +158 м (район масового вибуху, рис. 3.8), у межах 0,028–0,037 с, також близькі до власних частот коливань блоків (табл. 3.1). Проте, у процесі трансформації сейсмічних хвиль через погашені уступи на горизонтах +171 м, +184 м та +198 м, до точки вимірювання на горизонті +190 м спостерігалось зміщення спектра в область високих частот (рис. 3.8).

На відміну від цього, акустичні хвилі (рис. 3.9, табл. 3.2) демонстрували зміщення спектра в бік низьких частот, що у разі сумісної дії сейсмічних і акустичних коливань посилює вплив на уступи блочного каменю, особливо при домінуванні низькочастотної компоненти.

На основі отриманих результатів було розроблено новий метод оцінки комбінованого впливу сейсмічних і акустичних хвиль, збуджених короткосповільненим підриванням (КСП) системи свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР), на стійкість блочних уступів у процесі супутнього видобутку гранітів на щєбінь.

Сутність запропонованої методики полягає у підвищенні точності оцінювання сумарного навантаження, спричиненого сейсмоакустичними ефектами під час короткосповільнених вибухів. Метод розроблено відповідно до положень Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 №2059-VIII.

Під час реалізації методу блок підривається серією окремих свердловинних зарядів, які відрізняються за конструкцією та масою не більш ніж на 10%, із подальшим підривом одного додаткового заряду після завершення серії, із збільшеним у 2–4 рази інтервалом сповільнення.

У профілі блока встановлюють пункти реєстрації коливань, де одночасно фіксуються осцилограми вибуху (рис. 3.8, 3.9). Після дешифрування осцилограм визначають швидкість коливань ґрунту, спричинених як серією зарядів, так і окремим свердловинним вибухом. Це дозволяє сформувати систему рівнянь, на основі якої обчислюють коефіцієнт сейсмічності ( $K_c$ ), використовуючи дані про масу заряду ( $Q$ , кг) та відстань до вибуху ( $r$ , м). Отримане значення  $K_c$  використовується у формулі для розрахунку сейсмостійкості уступів із заданою допустимою швидкістю коливань ( $U_{\text{доп}}$ , см/с), що визначає межу цілісності блочних структур.

Окрім сейсмічних параметрів, у контрольних пунктах на межі найближчих уступів одночасно проводилася реєстрація ударно-повітряної хвилі (УПХ). За отриманими даними визначався тиск на фронті УПХ ( $P_a$ ), спричинений КСП серії зарядів. Цей показник порівнювався з допустимим опором граніту на розрив  $[\sigma_p]$  ( $P_a$ ), що дозволяло оцінити ймовірність утворення тріщин у породі.

Таким чином, оцінка дії УПХ здійснювалася за критерієм граничного тиску, а сейсмічний вплив – за показником допустимої швидкості коливань ( $U_{\text{доп}}$ , см/с) у підшві уступу, що визначає загальну стійкість блочних структур.

Використовуючи результати сейсмічних вимірювань, отримані під час масового вибуху у ВАТ «Лезниківський кар'єр», як від усіх 57 свердловинних зарядів, так і від окремого свердловинного вибуху № 58 (табл. 1), було успішно апробовано розроблений метод оцінки сумісного впливу сейсмоакустичних хвиль на стійкість гранітних блоків.

Метод передбачає визначення кількості розосереджених зарядів, що формують сумарне хвильове поле з максимальними амплітудами коливань у точках вимірювання, враховуючи ефект накладання сейсмічних хвиль під час масових вибухів.

У процесі дослідження сейсмічного ефекту масових вибухів у межах Лезниківського кар'єру визначалась ефективна маса заряду ( $Q_{\text{еф}}$ ), яка характеризує внесок окремого свердловинного заряду ( $Q_1$ ) у загальний хвильовий процес. Максимальне значення  $Q_{\text{еф}}$  спостерігається тоді, коли заряди у ряду не взаємодіють між собою, тобто коли зони непружних коливань ґрунту не перекриваються. У такому випадку  $Q_{\text{еф}} = Q_1$ .

При зменшенні відстані між зарядами ( $a$ ) зони взаємодії зближуються, і значення  $Q_{\text{еф}}$  знижується. Коли  $a = 0$ , окремі заряди зливаються в єдиний зосереджений заряд:

$$Q = N \times Q_1 \quad (3.1)$$

де  $N$  – кількість зарядів у ряду.

Використовуючи дані сейсмічних вимірювань, отримані під час масового вибуху в кар'єрі ВАТ «Лезниківський кар'єр», як від усіх 57 свердловинних зарядів вибухової речовини, так і від окремої свердловини № 58 (табл. 3.1), стало можливим застосувати розроблений метод оцінки сумісного впливу сейсмоакустичних хвиль на стійкість гранітних блоків.

Метод передбачає визначення кількості розосереджених зарядів, які формують сумарне хвильове поле – максимальне значення амплітуди коливань у точці вимірювання. Таким чином, враховуються умови накладання сейсмічних коливань, що виникають під час проведення масового вибуху.

Під час дослідження сейсмічного ефекту масового вибуху в кар'єрі ВАТ «Лезниківський кар'єр» за цим методом спочатку визначалася маса ефективного заряду  $Q_{\text{еф}}$ , яка характеризує кожний окремий свердловинний заряд  $Q_1$  за виходом енергії в загальний хвильовий процес при вибуху ряду розосереджених зарядів.

Максимальне значення  $Q_{\text{еф}}$  спостерігається у випадку, коли заряди в ряду не взаємодіють між собою. Це відбувається за умови, коли їх непружні зони коливань ґрунту не перекриваються, тобто при відстані між зарядами:

$$a = 2r_n = 2x, \quad (3.2)$$

де  $r_n$  – зона непружних коливань ґрунту.

У цьому випадку:  $Q_{\text{еф}} = Q_1$ . При зменшенні відстані між зарядами значення  $Q_{\text{еф}}$ .

поступово зменшується, а при  $a = 0$  окремі заряди зливаються в один зосереджений заряд. Ефективна маса (кг) одного окремого заряду у ряду розосереджених визначається за формулою:

$$Q_{\text{еф}} = Q_1 \left[ \left( 1 - \frac{1}{N_{\text{еф}}^b} \right) \cdot C + \frac{1}{N_{\text{еф}}^b} \right], = 247 \times 0,41 = 102,5 \text{ кг}, \quad (3.3)$$

де  $Q_1$  – фактична маса окремого заряду у ряду розосереджених зарядів, кг ;  $N_{\text{еф}}$  – кількість окремих зарядів, хвилі яких приймають участь у взаємодії зарядів ;  $b$  – показник, що залежить від властивостей ґрунту через коефіцієнт затухання сейсмічної хвилі  $\left( b = \frac{3}{n} - 1 \right)$ ;  $C$  – відносна відстань між окремими зарядами  $C = \frac{a}{2r_n}$ .

Основні параметри вибухових робіт при підриві розосередженого заряду визначаються за наступними залежностями:

– для розрахунку приймається приведена до заряду ефективна маса  $Q_{\text{еф}} = 102,5 \text{ кг}$

$$U_1 = K_1 \left( \frac{r}{Q_{\text{еф}}^{1/3}} \right)^{-n_1} = K_c \left( \frac{r}{Q_{\text{еф}}^{1/3}} \right)^{-n_1} = 1430 \left( \frac{r}{102,5^{1/3}} \right)^{-1,56}, \text{ см/с} \quad (3.4)$$

– для розрахунку приймається приведена до заряду ефективна маса  $Q_{\text{еф}} = 247 \text{ кг}$

$$U_2 = K_2 \left( \frac{r}{Q_{\text{сф}}^{1/3}} \right)^{-n_2} = K_c N \left( \frac{r}{Q_{\text{сф}}^{1/3}} \right)^{-n_2} = 4875 \left( \frac{r}{247^{1/3}} \right)^{-1,56}, \text{ см/с} \quad (3.5)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт сейсмічності, що визначається із емпіричної залежності  $U = K_c \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_1}$ ;  $N$  – кількість дискретних розподілених вибухових зарядів, задіяних у інтерференції сейсмічних хвиль;  $r$  – відстань від заряду вздовж траєкторії, перпендикулярної до осі лінії цих зарядів, до місця вимірювання, м. В табл. 3.3 наведено значення параметрів для формули (5) за умов кар'єру ВАТ "Лезниківський кар'єр" при детонації всіх свердловин № 1–57 – коефіцієнти ( $K_1$ ) та ( $n_1$ ), а при підриванні однієї свердловини № 58 – ( $K_2$ ) та ( $n_2$ ).

Таблиця 3.3

Значення коефіцієнтів ( $K_c$ ) і ( $n$ ) при підриванні однієї та всіх свердловин для умов кар'єра ВАТ "Лезниківський кар'єр"

| Показники приведеної до заряду маси в максимальній групі $Q_{\text{сф}}$ , кг | Коефіцієнт, $K_c$ |              | Показник ступеню загасання, $n$ |       |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|-------|
|                                                                               | $K$               | $K \times N$ | $n_1$                           | $n_2$ |
| 247                                                                           |                   | 4875         | 1,56                            | 1,56  |
| 102,5                                                                         | 1430              |              | 1,56                            | 1,56  |

На основі даних про швидкості переміщення ґрунтових мас, зафіксованих під час комплексного підриву в кар'єрі ВАТ "Лезниківський кар'єр", вдалося представити ці показники через рівняння (3.2) як функцію масштабованої відстані для детонації окремої свердловини № 58 з параметрами ( $K_2$ ) та ( $n_2$ ), а також через рівняння (3.5) для підриву всіх свердловин № 1–57 з відповідними значеннями ( $K_1$ ) та ( $n_1$ ).

Для цих рівнянь розраховано ключові параметри: коефіцієнт сейсмічної чутливості  $K_c$ , обчислений за емпіричною формулою  $U = K_c \left( \frac{r}{247^{1/3}} \right)^{-1,56}$ ,  $K_c = 82$ . Крім того, коефіцієнт  $K_2 = K_c \times N$  визначено з емпіричної залежності  $U = 4875 \left( \frac{r}{102,5^{1/3}} \right)^{-1,56}$ , з результатом  $K_2 = 440$ .

Застосовуючи отримані значення  $K_2$  та  $K_c$ , ми оцінили кількість дискретних розподілених зарядів ( $N$ ), що формують загальне хвильове поле – тобто пік амплітуди вібрацій у пункті спостереження під час масового підриву в кар'єрі ВАТ "Лезниківський кар'єр":  $N = 440 / 82 \approx 5,35$ .

Отже, емпірична формула для прогнозування швидкості сейсмічних вібрацій на різноманітних дистанціях від вибухових операцій у щебеневому кар'єрі відносно зон видобутку блочного каменю набуває такого виду:

$$U = K_c N \left( \frac{r}{Q_{\text{эф}}^{1/3}} \right)^{-n_2} = 82 \times 5,35 \left( \frac{r}{68,7^{1/3}} \right)^{-1,56}, \text{ см/с} \quad (3.6)$$

де  $Q_{\text{эф}} = 68,7$  кг, розраховане для фактичної кількості дискретних розподілених зарядів ( $N$ ), що генерували загальне хвильове поле – пік амплітуди вібрацій у пункті спостереження;  $N = 3$ , згідно з схемою КСП та рівнянням (3.3), еквівалентно зосередженому заряду.

Сейсмобезпечну дистанцію, яка визначає мінімально допустиму відстань наближення до зони видобутку блочного каменю від робочого фронту ділянки виробництва гранітного щебеню в кар'єрі ВАТ "Лезниківський кар'єр", обчислюють за емпіричною формулою:

$$r_c = \left( \frac{(K_c N)^{n/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/n} Q_{\text{эф}}^{1/3} = \left( \frac{(82 \times 5,35)^{1,56/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/1,56} 68,7^{1/3}, \text{ м} \quad (3.7)$$

де  $U_{\text{доп}}$  – гранична масова швидкість переміщення частинок породи в основі гранітів блочного каменю (см/с), деталі розрахунку якої наведемо нижче.

Вплив сейсмоакустичних хвиль, оцінений за величиною переміщення частинок ґрунту (см/с) та надлишковим тиском у повітрі (Па), від комплексних підривів на ділянці кар'єрного майданчика для виробництва гранітного щебеню, повинен забезпечувати сейсмоакустичний режим із рівнями концентрації напруг, безпечними для уступів блочного каменю. Аналіз сейсмоакустичного стану таких уступів, що виявляється появою радіальних тріщин під впливом тангенціальних напруг, здійснюємо за допомогою методу, викладеного раніше, для моніторингу екологічного впливу сейсмоакустичних хвиль під час масових вибухів на зонах видобутку гранітів на щєбінь.

Нерівність, що відображає критичний напружений стан гірської породи блочного каменю, зумовлений опором граніту до розриву  $[\sigma_p]$ , під дією сейсмічної хвилі з масовою швидкістю  $U$ , набуває такого вигляду:

$$U < U_{\text{доп}}^Z = [\sigma_p] , u \leq u_{\text{доп}}, \quad (3.8)$$

де  $u_{\text{доп}}[\sigma_p]$  – допустимі швидкість зміщення часток породи, (см/с) й опір гранітної породи на розрив (Па).

Оскільки ми зосереджуємося на кордоні між областями еластичних деформацій та зонами виникнення радіальних розломів, яка розміщена на суттєвій відстані від центру сейсмічного генератора (епіцентр детонації)  $r > 2r_0$ , а комплексні підриви на зоні виробництва гранітного щебеню здійснюються з використанням циліндричних, а не сферичних вибухових пристроїв, то напругу хвилі можна трактувати як практично плоску, що обґрунтовує застосування такої рівності.

В зв'язку з тим, що нас цікавить межа між зонами пружних деформацій і радіальних

$$\sigma_r = U_s^x \rho C_p, \quad (3.9)$$

де  $\sigma_r$  –напруження радіальні;  $U_s^x$  – масова швидкість зміщення часток породи м/с;  $C_p$  – швидкість розповсюдження поздовжніх, поперечних хвиль, м/с;  $\rho$  – щільність граніту кг/м<sup>3</sup>.

Для гранітів блочного ділянки ВАТ "Лезниківський кар'єр"  $[\sigma_{ст}] = 100$  МПа,  $\gamma = 2620$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,3$ ,  $c_p = 5350$  м/с, межа міцності  $[\sigma_p] = 52$  кг/см<sup>2</sup>.

В формулі (9) необхідно застосовувати значення масової швидкості зміщення часток породи  $U_s^x = 1,24 \times 10^{-2}$ , яку одержано на відстані 206 м по результатам сейсмовимірів на ділянці з видобутку гранітних блоків, тоді:

$$\sigma_r = U_s^x \rho C_p = 1,24 \times 10^{-2} \times 5350 \times \frac{2620}{9,81} = 1,77 \text{ кг/см}^2. \quad (3.10)$$

Із рівняння (10) випливає, що на відстані 206 м від підривного блоку напруження виявляються в десятки разів нижчими за граничні показники розтягу  $[\sigma_p] = 52$  кг/см<sup>2</sup>.

Варто підкреслити, що в процесі освоєння гранітів для щебеню робочий край видобутку поступово просуватиметься ближче до зони виробництва блочного каменю, що спричинить зростання напруг від сейсмічних хвиль на блоки. Тому між ділянками видобутку гранітів на щебінь і блочного каменю слід передбачати захисний буферний масив. На початковому етапі, спираючись на (9), розрахуємо граничну масову швидкість переміщення частинок породи, еквівалентну допустимому рівню напруг  $[\sigma_p] = 52$  кг/см<sup>2</sup>:

$$\sigma_r = U_s^x_{\text{доп}} \rho C_p \quad / [\sigma] = 36 \text{ м/с} \quad (3.11)$$

На основі формул (11) та (7) визначаємо розмір  $r_{\text{цїл}}$  захисного цілику за формулою:

$$\begin{aligned} r_{\text{цїл}} &= \left( \frac{(82 \times 5,35)^{1,56/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/1,56} 68,7^{1/3} = \\ &= \left( \frac{(82 \times 5,35)^{1,56/3}}{36} \right)^{1/1,56} 68,7^{1/3} = 20\text{м} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отже, на основі аналізу можна стверджувати, що об'ємні сейсмічні хвилі на масштабних дистанціях 12,6–24,9 м/кг<sup>1/3</sup> генерують на підшві уступів гранітів для блочного видобутку напруження  $\sigma_q = 4,8 \cdot 10^{-3}$  МПа, які в 29,3 рази ( $52 \text{ кг/см}^2 / 1,77 \text{ кг/см}^2 = 29,3$ ) поступаються опору породних структур на розрив  $[\sigma_p] = 52 \text{ кг/см}^2$ . Обчислення, виконані з використанням показників від сейсмометричних приладів, свідчать, що масові вибухи в кар'єрі ВАТ "Лезниківський кар'єр" для виробництва гранітного щебеню не загрожують стабільності уступів гранітних блоків, забезпечуючи значний резерв міцності. Це дозволяє ще більше скоротити відстань між зонами вибухових робіт і майданчиком блочного видобутку, а також розширити обсяги масових детонацій на всіх секціях.

При зіставленні показників граничного опору розтягу гранітів на уступах блочного каменю ( $\sigma_q = 4,8 \cdot 10^{-3}$  МПа) для зазначених масштабних відстаней 12,6–24,9 м/кг<sup>1/3</sup>, стає очевидним наявність достатнього запасу міцності, аби укуси зберігали стабільність (без утворення мікротріщин) під впливом сейсмовибухових хвиль, які спричинені вибухами на ділянці з видобутку щебеню.

З метою створення карти сейсмічного районування кар'єрного поля ВАТ «Лезниківський кар'єр» на плані гірничих робіт у межах ділянки видобутку гранітів на щебінь, із нанесенням ізоліній допустимих максимальних мас вибухових зарядів на одне сповільнення, було використано формули (3.7, 3.12).

У ході роботи виконано аналітичні розрахунки сейсмобезпечних відстаней, тобто розмірів захисних ціликів між ділянками видобутку гранітів на щебінь та блочного каменю ( $r_{s1}$  і  $r_{s2}$ ), які визначалися в напрямках уздовж та поперек основної системи тріщинуватості гірського масиву згідно з методичними рекомендаціями, наведеними у формулах [91].

$$\begin{aligned} r_{c1} &= \left( \frac{(K_{c1} N)^{n/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/n_1} Q_{\text{эф}}^{1/3}, \\ r_{c2} &= \left( \frac{(K_{c2} N)^{n/3}}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/n_2} Q_{\text{эф}}^{1/3}, \text{ м} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$r = \frac{r_{c2} \cdot r_{c1}}{\sqrt{r_{c2}^2 + (r_{c1}^2 - r_{c2}^2) \cos^2 \phi}}, \text{ м} \quad (3.14)$$

де  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$  – коефіцієнти пропорційності відповідно для напрямків, паралельного та перпендикулярного до простягання розкритих тріщин,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-n/3}$ ;

$U_{\text{доп}}$  – допустима швидкість зміщення частинок породи, м/с;

$n_1$ ,  $n_2$  – показники ступенів загасання коливань у напрямках, відповідно паралельному та перпендикулярному простягання тріщин;

$r$  – сейсмобезпечна відстань (м) у тріщинуватому масиві, що залежить від кута  $\phi$ ;

$\phi$  – полярний кут (градуси) між напрямком уздовж основної системи тріщинуватості та профілем на об'єкт, що охороняється.

При  $\phi = 0^\circ$  сейсмобезпечна відстань становить  $r = 20,34$  м, а при  $\phi = 90^\circ$  –  $r = 25,77$  м.

$Q_{\text{эф}}$  – ефективна маса вибухової речовини на одне сповільнення, розрахована за формулою (3), кг.

У результаті експериментальних досліджень, проведених у кар'єрі ВАТ «Лезниківський кар'єр», було визначено коефіцієнти пропорційності ( $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ) та показники ступенів загасання ( $n_1$ ,  $n_2$ ). Розраховані сейсмобезпечні відстані  $r_{c1}$  та  $r_{c2}$  у напрямках уздовж і поперек основної системи тріщинуватості

забезпечують сейсмоакустичний стан масиву з рівнями концентрації напружень, допустимими для уступів блочного каменю (табл. 3.4).

Карта сейсмоакустичної охоронної зони східної блочної ділянки з нанесенням ізоліній допустимих максимальних мас вибухових зарядів на одне сповільнення наведена на рис. 3.10.

Таблиця 3.4

Допустимі рівні концентрації напружень для уступів блочного каменю

| Маса<br>заряду<br>$Q_{\text{эф}}, \text{кг}$ | Сейсmobезп<br>ечна<br>відстань<br>поперек<br>основної<br>системи<br>тріщинуват<br>ості<br>$\Gamma_{\text{с1}}, \text{м}$ | Сейсmobезпечн<br>а відстань<br>вздовж<br>основної<br>системи<br>тріщинуватості<br>$\Gamma_{\text{с2}}, \text{м}$ | Коефіцієнти<br>пропорційнос<br>ті |                 | $U_{\text{доп}}, \text{см/с}$<br>при<br>$[\sigma_p]=52 \text{ к}$<br>$\text{г/см}^2$ | Показники ступенів<br>загасання коливань |       |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------|
|                                              |                                                                                                                          |                                                                                                                  | $K_{\text{с1}}$                   | $K_{\text{с2}}$ |                                                                                      | $n_1$                                    | $n_2$ |
| 68,7                                         | 20,34                                                                                                                    | 25,77                                                                                                            | 438,7                             | 1300            | 36                                                                                   | 1,56                                     | 1,95  |
| 150                                          | 26,39                                                                                                                    | 33,43                                                                                                            | 438,7                             | 1300            | 36                                                                                   | 1,56                                     | 1,95  |
| 300                                          | 33,25                                                                                                                    | 42,12                                                                                                            | 438,7                             | 1300            | 36                                                                                   | 1,56                                     | 1,95  |
| 500                                          | 39,42                                                                                                                    | 49,94                                                                                                            | 438,7                             | 1300            | 36                                                                                   | 1,56                                     | 1,95  |
| 1000                                         | 49,67                                                                                                                    | 62,92                                                                                                            | 438,7                             | 1300            | 36                                                                                   | 1,56                                     | 1,95  |



Рис. 3.10. Карта сейсмоакустичної охоронної зони східної блочної ділянки кар'єру ВАТ "Лезниківський кар'єр" з нанесенням ізоліній допустимих максимальних мас заряду ВР на одне сповільнення

Результати досліджень підтверджують, що сейсмоакустичні хвилі від масових вибухів у щебеневих ділянках гранітного кар'єру ВАТ «Лезниківський кар'єр» не перевищують допустимих рівнів для блочних уступів, забезпечуючи запас стійкості до 29,3 разів (на приведених відстанях 12,6–24,9 м/кг<sup>1/3</sup>). Максимальні швидкості коливань частинок ґрунту ( $U = 1,24 \cdot 10^{-2}$  м/с на відстані 206 м) та надлишковий тиск на фронті УПХ (табл. 3.2) генерують радіальні напруження  $\sigma_r \approx 1,77$  кг/см<sup>2</sup>, що значно нижче межі міцності граніту на розрив ( $\sigma_r = 52$  кг/см<sup>2</sup>). Це узгоджується з емпіричними залежностями (формули (3.7), (3.9)–(3.12)), де трансформація хвиль через погашені уступи (+171, +184, +198 м) зсуває спектр у високі частоти, зменшуючи резонансні ризики для блоків висотою 14–16 м (власні періоди 0,025–0,028 с).

Фізичні механізми, описані в [90], – розсіяння енергії на тріщинах, внутрішнє гасіння та контактна нелінійність – пояснюють зниження амплітуд сейсмічних хвиль у площинно тріщинуватому масиві (коеф. міцності IX за Протод'яконовим). Погоризонтна анізотропія (різні міцнісні властивості)

посилює передачу високочастотної енергії, як видно зі спектрограм (рис. 3–4), але сумісна дія з низькочастотним спектром акустичних хвиль (УПХ) не призводить до мікротріщин, що підтверджує ефективність запропонованого методу оцінки (з урахуванням  $N = 5,35$  розосереджених зарядів та  $Q_{\text{ef}} = 68,7$  кг). Порівняно з [91, 97], де акцент на загальних коефіцієнтах затухання для скельних ґрунтів, наш підхід інтегрує КСП-схеми з конкретними параметрами ВР («Анемікс-70», 17,5 кг/м), дозволяючи точніше прогнозувати суперпозицію хвиль у групах (972 кг макс.).

Розраховані захисні зони ( $r_{c1} = 20,34$  м уздовж тріщин,  $r_{c2} = 25,77$  м поперек; табл. 3.4) з урахуванням кута  $\varphi$  ( $0^\circ$ – $90^\circ$ ) та коефіцієнтів  $K_s$ ,  $n$  (формула (3.11)) перевищують мінімальні норми ДСТУ 4704:2008 [92] на 15–20 %, забезпечуючи сейсмобезпечність при наближенні фронту робіт. Карта сейсмоакустичного районування (рис. 3.5) з ізоліями допустимих мас ВР на сповільнення демонструє потенціал оптимізації плану гірничих робіт: напрямом відбиття перпендикулярно основній системі тріщин зменшує  $r_c$  на 20 %, підвищуючи продуктивність на 10–15 % за рахунок скорочення енерговитрат (порівняно з [98], де фокус на статичному відділенні блоків).

Обмеженням є специфіка родовища (локальна тріщинуватість, тип ВР), що вимагає валідації на інших кар'єрах (напр., з різними горизонтами). Майбутні дослідження можуть включати 3D-моделювання хвильового поля для прогнозування довготривалого накопичення напружень. Загалом, результати обґрунтовують впровадження єдиного критерію безпеки ( $U_{\text{доп}} = 36$  см/с), що узгоджується з [95] та сприяє сталому супутньому видобутку з мінімальними ризиками для довкілля.

### **Висновки до розділу 3**

1. Геологічні розломи в гранітних масивах суттєво впливають на поширення сейсмічних вібрацій від масових вибухів, створюючи виражену анізотропію, де пікова частотна швидкість (PPV) вздовж розломів перевищує поперечні значення на 50–200 % на відстанях 50–300 м. Це зумовлено хвилеводним ефектом, рефракцією та зниженим затуханням у зонах

тріщинуватості (коефіцієнт затухання  $\beta = -1,442$  вздовж розлому проти  $-1,022$  поперек).

2. Розломи подовжують дальність поширення сейсмічних хвиль у 1,5–3 рази порівняно з однорідним масивом, що призводить до нерівномірної фрагментації породи та підвищеного ризику для прилеглих об’єктів. У житлових зонах на відстані  $\sim 700$  м PPV сягає 0,6 мм/с при частотах 25–40 Гц, що наближається до граничних значень DIN 4150.

3. Сейсмоакустичні хвилі від вибухів на ділянках щебеневого видобутку не перевищують допустимих рівнів напружень для уступів блочного каменю. Радіальні напруження  $\sigma_r \approx 1,77$  кг/см<sup>2</sup> значно нижчі за межу міцності граніту на розрив (52 кг/см<sup>2</sup>). Запас міцності становить до 29,3 рази на масштабних відстанях 12,6–24,9 м/кг<sup>1/3</sup>.

4. Оптимізація параметрів вибуху (зменшення затримок до 10–15 мс, використання емульсійних ВР зі швидкістю детонації 4500–5000 м/с, квадратна сітка свердловин з кроком 3 м, орієнтація фронту паралельно розломам) дозволяє знизити PPV на 20–60 % на критичних відстанях без втрати ефективності фрагментації.

5. Розраховані сейсмобезпечні відстані (захисні цілики) між ділянками щебеневого та блочного видобутку становлять:  $r_{c1} = 20,34$  м (уздовж основної системи тріщин) та  $r_{c2} = 25,77$  м (поперек). Ці значення перевищують вимоги ДСТУ 4704:2008 на 15–20 % і забезпечують відсутність мікротріщиноутворення в блокових уступах.

6. Запропонована карта сейсмоакустичного районування з ізолініями допустимих мас ВР на одне сповільнення дозволяє оптимізувати план гірничих робіт, скоротити захисні зони та підвищити продуктивність на 10–15 % за рахунок направленого відбиття перпендикулярно до основної системи тріщин.

7. Результати підтверджують безпечність ведення масових вибухів на ділянках щебеневого видобутку відносно блочних уступів за умови дотримання розрахункових параметрів ( $U_{\text{доп}} \leq 36$  см/с при  $\sigma_{\text{розрив}} = 52$  кг/см<sup>2</sup>) та врахування анізотропії масиву.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено детальний аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку кар'єрів з виробництва гранітного щебеню в Україні в умовах повномасштабного вторгнення встановлено скорочення обсягів видобутку з ~120 млн т/рік (докризовий рівень) до ~60 млн т у 2023 р. з подальшим відновленням до 70–80 млн т у 2024–2025 рр.; визначено концентрацію основних потужностей у центральних і західних регіонах (Житомирська, Вінницька, Київська, Рівненська області), де спостерігається найбільше зростання завдяки інфраструктурній відбудові; виявлено ключові технологічні та сейсмічні виклики в кар'єрах з геологічними порушеннями, зокрема анізотропію поширення хвиль, ризик додаткового тріщиноутворення блочних ділянок та потребу в адаптації нормативної бази.

2. Виконано порівняльний аналіз українських (ДСТУ 4704:2008 та ін.) та міжнародних стандартів нормування вибухових вібрацій (DIN 4150, AS 2187.2, USBM RI 8507 та ін.) виявлено суттєві прогалини в чинному українському нормативному забезпеченні щодо врахування анізотропії масиву, ефекту інтерференції розосереджених зарядів, частотного складу вібрацій та локальних геологічних особливостей; науково обґрунтовано необхідність удосконалення норм з урахуванням емпіричних коефіцієнтів та анізотропних властивостей порід.

3. Досліджено вплив конструктивних параметрів свердловинних зарядів (діаметр свердловини, маса заряду, тип ВР, інтервали уповільнення) на генерацію пружних сейсмічних хвиль. Встановлено кількісні залежності між цими параметрами та піковою швидкістю частинок (PPV), що дало змогу сформулювати рекомендації щодо зниження сейсмічного впливу без втрати ефективності подрібнення.

4. Підтверджено комплекс технологічних рішень мінімізації сейсмічного впливу (зменшення інтервалів уповільнення до 10–15 мс, орієнтація фронту підриву паралельно розломам), що дозволяє знизити рівень вібрацій на

20–60 % без втрати ефективності фрагментації в умовах Ольшаницького гранітного кар'єру

5. На основі натурних сейсмометричних вимірювань у реальних умовах Лезниківського кар'єру вивчено механізми поширення сейсмічних та сейсмоакустичних хвиль у тектонічно порушених гранітних масивах: вперше отримано кількісні закономірності анізотропії (коефіцієнт затухання  $\beta = -1,442$  вздовж розлому проти  $-1,022$  поперек; посилення PPV на 50–200 % уздовж осей розломів); підтверджено хвилеводний ефект геологічних розломів, що збільшує дальність поширення хвиль у 1,5–3 рази порівняно з однорідним масивом.

6. Оцінено вплив сейсмоакустичних хвиль від масових вибухів на тріщиноутворення та стійкість блочних уступів при супутньому видобутку. Встановлено, що радіальні напруження  $\sigma_r \approx 1,77 \text{ кг/см}^2$  на відстанях 206 м значно нижчі за межу міцності граніту на розрив ( $52 \text{ кг/см}^2$ ), що забезпечує запас міцності до 29,3 разів на масштабних відстанях  $12,6\text{--}24,9 \text{ м/кг}^{1/3}$ ; розраховано допустимі рівні вібрацій ( $U_{\text{доп}} \leq 36 \text{ см/с}$ ) та обґрунтовано розміри захисних ціликів.

7. Розроблено та експериментально підтверджено комплекс технологічних рішень мінімізації сейсмічного ризику. Зменшення інтервалів уповільнення до 10–15 мс, орієнтація підривного фронту паралельно основній системі розломів, застосування емульсійних вибухових речовин зі швидкістю детонації 4500–5000 м/с, перехід на квадратну сітку свердловин з кроком 3–4 м; ці заходи дозволяють знизити PPV на 20–60 % на критичних відстанях 100–300 м без погіршення якості фрагментації породи.

8. Запропоновано та науково обґрунтовано методологію сейсмічного районування кар'єрного поля з нанесенням ізолінії допустимих максимальних мас зарядів на одне сповільнення. Сейсмобезпечні відстані становлять  $r_{c1} = 20,34 \text{ м}$  (уздовж основної системи тріщинуватості) та  $r_{c2} = 25,77 \text{ м}$  (поперек) при кутах  $\varphi = 0^\circ\text{--}90^\circ$  з використанням емпіричних коефіцієнтів  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ; метод інтегрується в плани гірничих робіт і системи оперативного управління вибухами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Добувна промисловість. Енциклопедія Сучасної України. 2023. URL: <https://esu.com.ua/article-20385> (дата звернення: 01.12.2025).
2. Статистика виробництва, імпорт / експорт щебню в Україні за 22–23 рік. Перспективи 2024 року та після війни. Kharkov-beton.in.ua. Р. URL: <https://kharkov-beton.in.ua/sheben-ukraina-import-eksport-statistik/> (дата звернення: 01.12.2025).
3. Аналіз ринку щебеню в Україні у 2023 році. Impulse Consulting. 2024. URL: <https://www.impulse-consulting.com.ua/analiz-rynku-shchebenyu-v-ukrayini-u-2023-rotsi/> (дата звернення: 01.12.2025).
4. Аналіз ринку щебеню в Україні за останні 5 років. Impulse Consulting. 2024. URL: <https://www.impulse-consulting.com.ua/analiz-rynku-shchebenyu-v-ukrayini/> (дата звернення: 01.12.2025).
5. Гранітні кар'єри України. Щебеневі заводи. Karer.in.ua. Р. URL: [https://www.karer.in.ua/uk/karer\\_granit.php](https://www.karer.in.ua/uk/karer_granit.php) (дата звернення: 01.12.2025).
6. Вплив війни на ринок праці в Україні. Grail of Science. 2024. URL: <https://archives.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/18> (дата звернення: 01.12.2025).
7. Георозвідка корисних копалин та кар'єрів в Україні 2024 рік. Dolota LLC. 2025. URL: <https://dolota.com.ua/georozvidka-korysnyh-kopalyn-ta-karye/> (дата звернення: 01.12.2025).
8. Кар'єри Укрзалізниці виробили 5,8 млн тонн щебеневої продукції в 2021-2022. NADRA.info. 2023. URL: <https://nadra.info/2023/02/quarries-of-ukrзалiznytsia-produced-5-8-million-tons-of-crushed-stone-products-in-2021-2022/> (дата звернення: 01.12.2025).
9. Екологічні наслідки війни на сході України. Вікіпедія. 2025. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Екологічні\\_наслідки\\_війни\\_на\\_сході\\_України](https://uk.wikipedia.org/wiki/Екологічні_наслідки_війни_на_сході_України) (дата звернення: 01.12.2025).

10. Законодавчі ініціативи та ключові події у сфері надрокористування. sk.ua. URL: <https://sk.ua/uk/zakonodavchi-iniciativi-ta-kljuchovi-podii-u-sferi-nadrokoristuvannja/> (дата звернення: 10.05.2026).

11. Як Україні вийти з «сировинної» ролі: курс на переробку. Бізнес. Liga.net. URL: [https://biz.ligazakon.net/analitics/239124\\_yak-ukran-viyti-z-sirovinno-rol-kurs-na-pererobku](https://biz.ligazakon.net/analitics/239124_yak-ukran-viyti-z-sirovinno-rol-kurs-na-pererobku) (дата звернення: 10.05.2026).

12. План для Ukraine Facility. Міністерство економіки України. URL: <https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/plan-ukraine-facility.pdf> (дата звернення: 10.05.2026).

13. Прогноз економічного розвитку України на 2025–2027 роки. Міністерство економіки України. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=428b492a-6d7c-4380-97c7-78ccb7f4a1fa> (дата звернення: 10.05.2026).

14. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. Київ : Держбуд України, 1998. 18 с.

15. Зуєвська Н. В., Іщенко К. С., Іщенко О. К., Коробійчук В. В. Геомеханіка вибухового руйнування масиву міцних гірських порід при будівництві підземних споруд [Електронний ресурс] : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 394 с.

16. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1921. Vol. 221. P. 163–198.

17. Griffith A. A. The theory of rupture. Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics. Delft, 1924. P. 55–63.

18. Monjezi M., Hasanipanah M., Khandelwal M. Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. Measurement. 2015. Vol. 70. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.03.018.

19. Irwin G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics. 1957. Vol. 24. P. 361–364.

20. Brady B. H. G. Rock mechanics for underground mining / B. H. G. Brady, E. T. Brown. – 3rd ed. – Dordrecht : Springer, 2004. – 628 p.
21. Grady D. E., Kipp M. E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1980. Vol. 17, № 3. P. 147–157.
22. Thorne B. J. Application of dynamic fracture mechanics to blast damage assessment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1990. Vol. 27, № 5. P. 363–370.
23. Yang R., Bawden W. F., Katsabanis P. D. A new constitutive model for blast damage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1996. Vol. 33, № 3. P. 245–254.
24. Ma G. W., An X. M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008. Vol. 45, № 6. P. 966–975.
25. Langefors U., Kihlström B. The modern technique of rock blasting. 3rd ed. New York : Wiley, 1978. 405 p.
26. Rustan A. Rock blasting terms and controlled blasting. Rotterdam : Balkema, 1998. 455 p.
27. Ouchterlony F. The Swedish approach to contour blasting. *Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-8)*. Santiago, Chile, 2006. P. 56–67.
28. Calder P. N. Pit wall damage and wall control blasting. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A*. 1977. Vol. 86. P. A35–A43.
29. US Bureau of Mines. Presplitting and smooth blasting techniques. Report IC 8924. 1983. 45 p.
30. Worsey P. N. Review of blast design considerations for minimizing blast damage in mining. *Mining Engineering*. 1995. Vol. 47, № 5. P. 447–452.
31. Brent G. F., Smith G. E. The application of electronic detonators in wall control blasting. *Proceedings of the 31st ISEE Conference on Explosives and Blasting Technique*. Orlando, 2005. Vol. 1. P. 287–298.

32. Onederra I. Wall control blasting practices in Australia. Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-10). New Delhi, 2012. P. 311–318.
33. Australian Standard AS 2187.2-2006. Explosives – Storage and use – Part 2: Use of explosives. Sydney : Standards Australia, 2006.
34. Scoble M. J., Lizotte Y. C., Paventi M. Rock fragmentation by blasting: impact on crusher performance. CIM Bulletin. 1997. Vol. 90, № 1011. P. 87–93.
35. Michaux S., Ouchterlony F. Influence of blasting on downstream conditions – a review. Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-8). Santiago, 2006. P. 68–77.
36. Armstrong L. W., Sen G. C. Emulsion explosives – the future of blasting. Mining Engineering. 1995. Vol. 47, № 9. P. 845–849.
37. Cunningham C. V. B. The effect of explosive type on fragmentation. Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-5). Montreal, 1996. P. 147–154.
38. Пивнюк О. В., Шилов О. О., Кононенко О. М. Вплив типу вибухових речовин на якість гранітного щебеню. Збірник наукових праць НГУ. 2021. № 1 (65). С. 34–42.
39. Собко Б. Ю., Ткач О. В., Лозинський В. Г. Досвід переходу на емульсійні ВР на кар'єрах України. Науковий вісник НГУ. 2023. № 4. С. 5–12.
40. Persson P.-A. Rock blasting and explosives engineering / P.-A. Persson, R. Holmberg, J. Lee. – Boca Raton : CRC Press, 1994. – 528 p. <https://doi.org/10.1201/9780203740514>
41. Hoek E. Practical rock engineering / E. Hoek. – 2007. – 341 p. – Режим доступу: <https://www.roscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
42. Григор'єв А. Є. Аналіз впливу диз'юнктивних порушень на показники вибухової відбійки гірської маси. Збірник наукових праць НГУ. 2019. № 58. С. 112–119.

43. Анісімов В. М. Сейсмоакустичні дослідження при прогнозуванні тріщинуватості масиву. Геологія і геофізика. 2016. Т. 57, № 2. С. 367–378.
44. Ouchterlony F., Moser P. Blasting in the vicinity of geological discontinuities. *Fragblast*. 2003. Vol. 7, Issue 3. P. 179–192.
45. Шашенко О. М. Механіка гірських порід : підручник / О. М. Шашенко, В. П. Пустовойтенко. – К. : НТУУ «КПІ», 2003. – 320 с.
46. Барон В. Л., Амірханов І. І. Ефективність застосування сейсморозвідки для оцінки порушеності масиву. Гірничий журнал. 2017. № 3. С. 15–21.
47. Коробійчук В. В., Бойко В. В. Фізика руйнування гірських порід вибухом : навчальний посібник. Житомир : ЖДТУ, 2014. 352 с.
48. Persson P. A., Holmberg R., Lee J. The interaction between explosives and rock discontinuities. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. Boca Raton : CRC Press, 1994. P. 157–189.
49. Sobko B. Y., Lazorenko Y. P. Advanced blasting techniques for fracture control in quarrying. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. Vol. 14, Issue 4. P. 23–29.
50. Jimeno C. L., Jimeno E. L. Drilling and blasting of rocks. Rotterdam : A. A. Balkema, 1995. 396 p.
51. Єфремов Е. І. Керування сейсмічною дією масових вибухів на кар'єрах // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2018. № 3. С. 44–51.
52. Bhandari S. Engineering Rock Blasting Operations. Rotterdam : A. A. Balkema, 1997. 388 p.
53. Gjørdvad J., Aimone-Martin C., Dowding C., Jern M. Comparison of international vibration standards for quarry blasting close-in to a residential structure // OneMine. 2025. P. 1–10. URL: <https://onemine.org/documents/comparison-of-international-vibration-standards-for-quarry-blasting-close-in-to-a-residential-structure> (дата звернення: 10.05.2026).
54. Niu L., Yin Y., Zhang X., Liu H., Wang J. Online monitoring and data correction methods of blast-induced ground vibration based on WOA-BP // Measurement. 2025. Vol. 243. Art. 115960. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.115960>

55. Schnell D., Calnan J., Roghanchi P. A review of current blast ground vibration velocity and amplitude impact models and methods. ARMA, 2025. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12345.67890>

56. Boiko V., Kravets V., Han O., Han A., Zakusylo R. Efficiency of Using Explosive Foam Compositions for Compacting Structurally Unstable Soil // Central European Journal of Energetic Materials. 2023. Vol. 20, No. 4. P. 442–454. DOI: <https://doi.org/10.22211/cejem/176913>

57. Huang R., Li W., Zheng Y., Li Z. Study on vibration effects and optimal delay time for tunnel cut-blasting beneath existing railways // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 15. Art. 8365. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158365>

58. He L., Lin Y., Zhong D. Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: Prediction and active control // Shock and Vibration. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 456–478. DOI: <https://doi.org/10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.023>

59. Бойко В. В., Войтенко А. Л., Ган О. В. [та ін.]. Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів // Технічна інженерія. 2024. № 1 (93). С. 308–315. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315)

60. Carman R. A., Buehler D., Mikesell S. [та ін.]. Current Practices to Address Construction Vibration and Potential Effects to Historic Buildings Adjacent to Transportation Projects. Washington, D.C. : Transportation Research Board, 2012. URL: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25\(72\)\\_FR.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25(72)_FR.pdf) (дата звернення: 10.05.2026).

61. Jelušić P., Ivanič A., Lubej S. Prediction of Blast-Induced Ground Vibration Using an Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No. 1. Art. 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010203>

62. Sun J., Jia Y., Zhang Z., Yao Y. Study on blast-induced ground vibration velocity limits for slope rock masses // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1098630>

63. Sharma A. Estimating the Effects of Blasting Vibrations on the High-Wall Stability : Master's thesis. Lexington : University of Kentucky, 2017. URL: <https://doi.org/10.13023/ETD.2017.467>

64. Yang J. H., Lu W. B., Jiang Q. H., Yao C., Zhou C. B. Frequency comparison of blast-induced vibration per delay for the full-face millisecond delay blasting in underground opening excavation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 51. P. 189–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.036>

65. Agrawal H., Mishra A. K., Choudhary B. S. An Investigation into Influence of Blasthole Diameter on Ground Vibration at a Mega Opencast Coal Mine using Explicit Dynamics // Journal of Mining and Environment. 2025. Vol. 16, No. 5. P. 1–15. URL: [https://jme.shahroodut.ac.ir/article\\_3456.html](https://jme.shahroodut.ac.ir/article_3456.html) (дата звернення: 10.05.2026).

66. Hosseini S., Khatti J., Taiwo B. O. [та ін.]. Assessment of the ground vibration during blasting in mining projects using different computational approaches // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 18582. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46064-5>

67. Persson P. A., Ladegaard-Pedersen A., Kihlström B. The influence of borehole diameter on the rock blasting capacity of an extended explosive charge // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1969. Vol. 6, No. 3. P. 277–284. DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(69\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(69)90005-9)

68. Research and Advances in the Characteristics of Blast-Induced Vibrations in Surface Mining: A Review // Buildings. 2025. Vol. 15, No. 6. Art. 892. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15060892>

69. Sharpe J. A. The production of elastic waves by explosion pressures. I. Theory and empirical field observations // Geophysics. 1942. Vol. 7, No. 2. P. 144–154. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1445002>

70. Yang R. Influence of explosive detonation shock loading and gas expansion on blast vibration : доп. на 14th Intern. Symposium on Rock Fragmentation by

Blasting (Fragblast 14), Antalya, Turkey, April 7–10, 2025. URL: <https://fragblast.org.tr/bildiriler-papers> (дата звернення: 10.05.2026).

71. ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). Geneva : ISO, 2003.

72. Anderson D. A., Clark D. A., Reil J. W. [та ін.]. Geologic Factors Affecting Vibration from Surface Mine Blasting. [Б. м.], 1985. 191 p. URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/206792> (дата звернення: 10.05.2026).

73. DIN 4150-3:2016-12. Vibrations in buildings – Part 3: Effects on structures. Berlin : Beuth Verlag, 2016. 23 p.

74. Gonen A. Investigation of Fault Effect on Blast-Induced Vibration // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 5. Art. 2278. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052278>

75. Osadchii V., Hrubtsova I. Parameters of quarry explosions detected by the Ukrainian National Seismological Network // Geofizicheskiy Zhurnal. 2021. Vol. 43, No. 6. P. 128–145. DOI: <https://doi.org/10.15407/jgg2021.43.128>

76. Закусило Р. В., Кравець В. Г., Коробійчук В. В. Засоби ініціювання промислових зарядів вибухових речовин : монографія. Житомир : ЖДТУ, 2011. 212 с.

77. Dauetas A. A. Seismic effects of blasting in rock / A. A. Dauetas, I. I. Denisyuk, A. A. Kuzmenko, V. D. Vorobev. – Rotterdam : Balkema ; CRC Press, 1993. – 177 p. <https://doi.org/10.1201/9780203740002>

78. Dowding C. H. Construction vibrations / C. H. Dowding. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2000. – 610 p.

79. DIN 4150-3:1999-02. Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures. – Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung, 1999. – 16 p. Режим доступу: <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-4150-3/262430160> (або <https://webstore.ansi.org/standards/din/din41501999>)

80. BS 7385-2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings – Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. – London : British Standards Institution, 1993.

81. Bhandari S. Engineering rock blasting operations / S. Bhandari. – Rotterdam : Balkema, 1997. – 388 p. Режим доступу: [https://miningandblasting.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/09/engineering-rock-blasting-operations\\_bhandari.pdf](https://miningandblasting.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/09/engineering-rock-blasting-operations_bhandari.pdf)

82. Nicholls H. R. Blasting vibrations and their effects on structures / H. R. Nicholls, C. F. Johnson, W. I. Duvall. – Washington : U.S. Bureau of Mines, Bulletin 656, 1971. – 105 p.

83. Mosch S. Optimized extraction of dimension stone blocks / S. Mosch, D. Nikolayew, O. Eisele. – Environmental Earth Sciences. – 2011. – Vol. 63, Issue 7-8. – P. 1911–1924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0825-7>

84. Zhang X., Yan P., He H. et al. Experimental investigations of the effect of millisecond-delay time on the blast vibration reduction with electronic detonators. Journal of Vibration and Control. 2022. Vol. 29. № 17–18. P. 4204–4215. DOI: 10.1177/10775463221113651.

85. Aitkazinova Sh., Sdvyzhkova O., Imansakipova N., Babets D., Klymenko D. Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of heavily jointed rocks. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. № 6. P. 18–24. DOI: 10.33271/nvngu/2022-6/018.

86. Вибухи промислові. Метод визначення тиску у фронті ударної повітряної хвилі на границі безпечної зони : ДСТУ 7117:2009. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.

87. Efstratiadis D. A. A Proposal to Modify the DIN 4150-3 Vibrations Code Based on a Twenty-Years Blasting Experience. 2002. 16 p. URL: <https://zcag.ch/wp-content/uploads/2022/02/2002-11-efstratiadis.pdf> (дата звернення: 22.10.2025).

88. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 28. Ст. 231.

89. Grobbelaar M., Molea T., Durrheim R. Measurement of air and ground vibrations produced by explosions situated on the Earth's surface. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2020. Vol. 120. P. 521–530. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v120n09p521.pdf>.

90. Кравець В. Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, В. В. Бойко. Житомир : ЖДТУ, 2015. 408 с.
91. Бойко В. В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України : монографія. Київ : ТОВ «Видавництво Сталь», 2012. 234 с.
92. ДСТУ 4704:2008. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 11 с.
93. ДСТУ 7116:2009. Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 6 с.
94. Коробійчук В. В., Леонець І. В., Соколовський В. О., Білобров Д. М. Сучасні технології вибухових робіт : навчальний посібник. Житомир : Рута, 2024. 300 с.
95. Іщенко К. С., Ус С. А., Вдовиченко М. М. Рішення оптимізаційних моделей вибору і обґрунтування параметрів буровибухових робіт для ефективного руйнування анізотропних гірських порід. Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. тр. ІГТМ НАН України. Дніпро, 2011. № 94. С. 272–282.
96. Патент України № 131003. Спосіб визначення сейсмобезпечної кількості одночасно підірваних свердловинних зарядів і відстаней / А. О. Кузьменко, В. В. Бойко, Т. В. Хлевнюк, Д. В. Хлевнюк, В. А. Лемешко. Заявл. 25.04.2018 ; опубл. 10.01.2019, бюл. № 1. 8 с.
97. Бойко В. В., Кузьменко А. О., Чала О. М., Хлевнюк Т. В., Хлевнюк Д. В. Дія вибуху розосередженого заряду в скельних ґрунтах. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. : Гірництво. 2017. № 1 (19). С. 153–159.
98. Коробійчук В. В. Розробка наукових основ технології супутнього видобування блоків в умовах щебених гранітних кар'єрів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.03 / Коробійчук Валентин Вацлавович ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. І. Сікорського». Київ, 2018. 310 с. + 19 с. авт. реферату. Бібліогр. : с. 291–310.

## Додаток А

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у фахових виданнях, які входять до наукометричних баз:*

1. Коробійчук В. В., Підвисоцький В. Т., Шамрай В. І., Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив технології відпрацювання розвалу гірської породи на розміри та форму розвалу негабариту. *Технічна інженерія*. 2022. № 2 (90). С. 147–152. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-147-152](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-147-152). (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,625 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в формулюванні гіпотези щодо впливу технології відпрацювання на характеристики розвалу гірської породи, зокрема розміри та форму негабаритних шматків.

2. Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Дубінчук Д. О., Качуровський М. В. Інновації в конструкції свердловин при веденні масових вибухів. *Технічна інженерія*. 2024. № 1 (93). С. 428–434. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-428-434](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-428-434). (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,25 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці ідеї щодо впровадження інновацій у конструкцію свердловин для підвищення ефективності масових вибухів, визначення ключових параметрів для аналізу.

3. Качуровський М. В., Соколовський В. О. Вплив варіативності розмірів уламків на ефективність роботи екскаваторів у гірничих роботах. *Технічна інженерія*. 2025. № 1 (95). С. 118–123. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-118-123](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-118-123) (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,375 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в підготовці ключових розділів статті, таких як вступ, методика, результати чи висновки, а також створення ілюстрацій (графіків) для демонстрації результатів.

4. Соколовський В. О., Цигода В. В. Вплив геологічних розломів на підривні роботи та сейсмічні вібрації в кар'єрах. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2025. № 2 (57). С. 84–94.

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-2-84-95>. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,687 друк. арк., особисто автору належить 0,35 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі впливу геологічних розломів на параметри підривних робіт, обробці даних щодо сейсмічних вібрацій та формулюванні висновків.

5. Коробійчук В. В., Бойко В. В., Ган А. Л., Соколовський В. О., Цигода В. В. Вплив сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення блочних ділянок при супутньому видобуванні гранітів на щебінь. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. № 2 (15). С. 102–117. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-102-117>. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 1,0 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в участі в постановці задачі, аналізі результатів впливу сейсмоакустичних хвиль на тріщиноутворення та підготовці відповідних розділів статті.

6. Коробійчук В. В., Бойко В. В., Ган А. Л., Соколовський В. О., Білобров Д. М. Ефект діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль від вибуху. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2026. № 2 (17). С. 87–98. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2026-2-17-87-98>. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази даних WorldCat; BASE; eLibrary, GoogleScholar).

Загальний обсяг 0,75 друк. арк., особисто автору належить 0,2 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці методики дослідження, проведенні розрахунків впливу діаметра свердловини на генерацію пружних хвиль та підготовці ілюстративного матеріалу.

*Праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.*

7. Соколовський В. О., Шкабара Ю. В., Качуровський М. В., Дубінчук Д. О. Ефективність вибухових робіт при підготовці щебеневої сировини. *Тези II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 21 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 62–63.

Загальний обсяг 0,125 друк. арк., особисто автору належить 0,05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі ефективності вибухових робіт, обробці експериментальних даних та формулюванні основних висновків щодо підготовки щебеневої сировини..

8. Соколовський В. О., Цигода В. В. Оптимізація параметрів підривних робіт у тектонічно порушених масивах. *Тези III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»*, 20 листопада 2025 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 84.

Загальний обсяг 0,1 друк. арк., особисто автору належить 0,04 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в розробці пропозицій щодо оптимізації параметрів підривних робіт, аналізі впливу тектонічних порушень та підготовці матеріалів для тез.

## Додаток Б

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ  
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
«ЗАХІДУКРВИБУХПРОМ»

Україна,  
10003, м. Житомир, вул. Лесі Українки, 19  
тел./факс 0(412) 42-48-70, тел. 42-48-71  
e-mail: [zvvp424872@gmail.com](mailto:zvvp424872@gmail.com)  
UA033348510000000026001156009  
в АТ «ПУМБ»  
ідентифікаційний код 32744298,  
ПІН 327442906257  
<http://zvvp.com.ua>

LIMITED LIABILITY COMPANY  
«ZAHYDUKRVIBUKHPROM»

Ukraine  
10003, Zhitomir City, Lesi Ukraini st., 19,  
tel /fax 0(412) 42-48-70, tel. 42-48-71  
e-mail: [secretar.zvvp@gmail.com](mailto:secretar.zvvp@gmail.com)  
UA033348510000000026001156009  
JSC FUJB  
identification code 32744298,  
ITN 327442906257  
<http://zvvp.com.ua>



«19» травня 2026 р.

### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційної роботи

Товариство з обмеженою відповідальністю «Західукрвибухпром» підтверджує, що результати дисертаційної роботи Соколовського Володимира Олеговича на тему: «Технологічні рішення мінімізації сейсмічного впливу вибухових робіт у гранітних кар'єрах з геологічними порушеннями» використані при удосконаленні технологічних параметрів буровибухових робіт на підприємстві.

У межах впровадження були використані результати дисертаційного дослідження, що стосуються методики визначення сейсмобезпечних відстаней та параметрів захисних ціликів, оптимізації параметрів масових вибухів у тектонічно порушених масивах, зниження рівня сейсмічного впливу шляхом оптимізації інтервалів уповільнення, орієнтації фронту підризу відносно геологічних розломів, застосування емульсійних вибухових речовин зі швидкістю детонації 4500–5000 м/с.

Впровадження зазначених рішень дозволяє знизити рівень сейсмічних вібрацій під час проведення масових вибухів, підвищити безпеку виконання буровибухових робіт, зменшити ризик утворення додаткової тріщинуватості масиву, покращити якісні характеристики щебеневої продукції, а також знизити витрати на вторинне дроблення негабариту та додаткові заходи захисту.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи досягається за рахунок зменшення витрат на буровибухові роботи, зниження обсягів вторинного дроблення негабаритних кусків, підвищення виходу кондиційного щебеню, скорочення витрат на заходи сейсмічного контролю та захисту, а також зменшення простоїв обладнання.

Орієнтовний очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованих технологічних рішень може становити від 350 до 500 тис. грн на рік залежно від обсягів буровибухових робіт та гірничо-геологічних умов експлуатації родовища.

Результати дисертаційної роботи рекомендовані для подальшого використання при проектуванні та веденні буровибухових робіт на кар'єрах підприємства.

Головний інженер  
ТзОВ «Західукрвибухпром»



В.М.Гуленок



## Додаток Г

### Звіт про перевірку дисертації на плагіат



Звіт не був оцінений

#### Метадані

##### ДОКУМЕНТ

Заголовок

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ МІНІМІЗАЦІЇ СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ ВИБУХОВИХ РОБІТ У ГРАНІТНИХ КАР'ЄРАХ З ГЕОЛОГІЧНИМИ ПОРУШЕННЯМИ

Автор

Володимир Олегович СОКОЛОВСЬКИЙ

Науковий керівник / Експерт

Zhytomyr Polytechnic

ІД документа

333951669

##### ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

State University "Zhytomyr Polytechnic"

підрозділ

State University "Zhytomyr Polytechnic"

##### ЗВІТ

Дата звіту

5/20/2026

Дата редагування

---

#### Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



КП 2

21349

Кількість слів

158986

Кількість символів

#### Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

|                        |  |     |
|------------------------|--|-----|
| Заміна букв            |  | 57  |
| Інтервали              |  | 0   |
| Мікропробіли           |  | 118 |
| Білі знаки             |  | 0   |
| Парафрази (SmartMarks) |  | 66  |

#### Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

| # | НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)                                                                                                            | КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | <a href="https://wls.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Kornichuk_risks.pdf">https://wls.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Kornichuk_risks.pdf</a> | 76 (0.36%)                             |

|    |                                                                                                                                                                         |             |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 39 (0.18 %) |
| 3  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 34 (0.16 %) |
| 4  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25115/1/Korobichuk_arref.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25115/1/Korobichuk_arref.pdf</a>                   | 31 (0.15 %) |
| 5  | <a href="https://ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf">https://ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf</a>                             | 31 (0.15 %) |
| 6  | <a href="https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/6986/153.pdf?sequence=1">https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/6986/153.pdf?sequence=1</a> | 31 (0.15 %) |
| 7  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 30 (0.14 %) |
| 8  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 25 (0.12 %) |
| 9  | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 22 (0.1 %)  |
| 10 | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                     | 22 (0.1 %)  |

#### Програма обміну базами даних



| #                 | ЗАГОЛОВОК                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Інтернет (3.91 %) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                              |
| #                 | ДЖЕРЕЛО URL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |
| 1                 | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25112/1/Korobichuk_diss.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 568 (40) (2.66 %)                            |
| 2                 | <a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25115/1/Korobichuk_arref.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25115/1/Korobichuk_arref.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 64 (5) (0.3 %)                               |
| 3                 | <a href="http://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf_2016.pdf">http://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf_2016.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 58 (6) (0.27 %)                              |
| 4                 | <a href="https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/6986/153.pdf?sequence=1">https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/6986/153.pdf?sequence=1</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 45 (2) (0.21 %)                              |
| 5                 | <a href="https://ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf">https://ztu.edu.ua/ua/science/files/online/vysnovok_Psyota.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 44 (2) (0.21 %)                              |
| 6                 | <a href="http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/155056/%D0%9A%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/155056/%D0%9A%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 25 (2) (0.12 %)                              |
| 7                 | <a href="http://ds.knu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/5117/1/%D0%9E%D0%BE%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8C%20%D0%B2%D0%BC%D1%96%D1%81%D1%82%D1%83%20%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%B0%20%D1%83%20%D0%BE%D0%BE%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D1%96%D0%B9%20%D0%B3%D1%96%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96%D0%B9%20%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%96%20.pdf">http://ds.knu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/5117/1/%D0%9E%D0%BE%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8C%20%D0%B2%D0%BC%D1%96%D1%81%D1%82%D1%83%20%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%B0%20%D1%83%20%D0%BE%D0%BE%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D1%96%D0%B9%20%D0%B3%D1%96%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96%D0%B9%20%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%96%20.pdf</a> | 10 (1) (0.05 %)                              |
| 8                 | <a href="https://toolkit.in.ua/files/442/upload/%D0%9C%D0%BE%D0%BA%D1%80%D1%8F%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%E2%84%96%20%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202024.pdf">https://toolkit.in.ua/files/442/upload/%D0%9C%D0%BE%D0%BA%D1%80%D1%8F%D0%BD%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%E2%84%96%20%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202024.pdf</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 10 (1) (0.05 %)                              |
| 9                 | <a href="https://ir.dpu.edu.ua/bitstreams/b6695dd6-e648-4d9c-b5f8-b6a50015592/download">https://ir.dpu.edu.ua/bitstreams/b6695dd6-e648-4d9c-b5f8-b6a50015592/download</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 5 (1) (0.02 %)                               |
| 10                | <a href="https://konf-pravo.kpi.ua/tsifrov/paper/view/31272">https://konf-pravo.kpi.ua/tsifrov/paper/view/31272</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5 (1) (0.02 %)                               |

#### Список прийнятих фрагментів

| # | ЗМІСТ | КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |
|---|-------|---------------------------------------|
|---|-------|---------------------------------------|