

УДК 622.235.432

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ І СЕЙСМОБЕЗПЕЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОВИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ В УМОВАХ ЗАКАРСТОВАНИХ ПОРОДНИХ МАСИВІВ

В. В. Бойко<sup>1†</sup>, А. О. Кузьменко<sup>1</sup>, Т. В. Хлевнюк<sup>1</sup>, О. М. Чала<sup>1</sup>, Н. І. Жукова<sup>2‡</sup>

<sup>1</sup>Інститут гідромеханіки НАН України  
вул. Желябова, 8/4, 03057, Київ, Україна  
<sup>†</sup>E-mail: [seismic-control@ukr.net](mailto:seismic-control@ukr.net)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”  
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна  
<sup>‡</sup>E-mail: [NataliaZ127@ukr.net](mailto:NataliaZ127@ukr.net)

Отримано 27.06.2017

Проаналізовано відомі теоретичні й експериментальні дослідження щодо методів розрахунку параметрів вибухових робіт з урахуванням властивостей порід, які руйнуються (зокрема, порід складної структури). Розглянуто розроблені конструкції зарядів і способи їх ініціювання, а також варіанти різних схем короткосповільненого підривання, здатних забезпечити якісне подрібнення масивів порід в осередку вибуху з одночасним дотриманням допустимого рівня сейсмобезпеки в зоні будівель (у тому числі, розташованих над карстовими порожнинами в зоні впливу кар'єра). Обґрунтовано сейсмобезпечні параметри масових вибухів на гіпсових кар'єрах. Досліджено особливості поширення різних типів хвиль у закарстованому масиві гірських порід від осередку вибуху до місця їхньої взаємодії з наземними об'єктами й карстовими порожнинами під ними. Отримано емпіричні коефіцієнти і вдосконалено формулу розрахунку сейсмобезпечної маси зарядів вибухової речовини під час короткосповільнених вибухів свердловинних зарядів з неелектричною системою ініціювання. Запропоноване співвідношення відрізняється від раніше відомих урахуванням статичної й динамічної складових навантаження, викликаного поперечною хвилею. Окрім того, береться до уваги наявність карстових порожнин, розташованих в активній зоні будинку до (або нижче) лінії нижньої межі статичного тиску. Проаналізовано специфічні особливості керованого детонування свердловинних зарядів вибухової речовини, розділених карстовою порожниною, з метою змикання останньої. Подальшого розвитку зазнали уявлення про поширення в закарстованому масиві порід сейсмічних коливань від масових вибухів у кар'єрах, а також про їхню взаємодію з поверхневими будівлями й карстовими порожнинами під ними, які розташовані над нижньою межею товщі, що стискається.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** статична та сейсмічна стійкість, кар'єр, допустимі маси зарядів, вибухова речовина, сейсмовимірювальні роботи, масові вибухи, закарстований ґрунтовий масив, карстові порожнини, швидкість коливань, сейсмобезпечність

## 1. ВСТУП

Одним з основних напрямків у галузі підричних робіт на кар'єрах в умовах закарстованих масивів порід є дотримання безпеки й ефективності вибухових робіт. З огляду на сучасну тенденцію до освоєння та розробки нових гіпсових родовищ вимоги до ефективності й безпеки підричних робіт значно підвищуються. Щодо сейсмобезпеки, то позитивне вирішення цього завдання значно ускладнюється умовами поширення сейсмовибухових хвиль (СВХ) в закарстованих породних масивах за межами кар'єру, де розташовані будівлі над порожнинами. На стійкість цих будинків, окрім сейсмічної дії вибухових хвиль, впливає додаткове статичне навантаження, обумовлене їхньою вагою і місцем розташування лінії нижньої межі статичного тиску (НГСТ), яка знаходиться між порожниною і фундаментом будівлі. Усі вищенаведені фактори пов'язані з сейсмо-небезпечною дією вибуху на навколишні наземні й підземні об'єкти, що охороняються.

Виходячи з цього, обґрунтування сейсмобезпечних параметрів буропідричних робіт на кар'єрах в умовах гірського масиву з карстовими порожнинами, які б забезпечували якісне подрібнення масиву з одночасним збереженням сейсмостійкості прилеглих до кар'єру наземних будівель та карстових порожнин під ними, є актуальною науково-практичною проблемою, вирішенню якої присвячено дану статтю. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні сейсмобезпечних параметрів підричних робіт для сейсмостійкості навколишніх наземних будівель і карстових порожнин під ними. Для її досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити емпіричні залежності швидкості сейсмічних коливань від приведеної до заряду відстані для гірничо-геологічних умов ведення вибухових робіт на гіпсових кар'єрах за результатами їх сейсмічного моніторингу вздовж профілів з наземними будівлями й карстовими порожнинами під ними;
- удосконалити аналітичний метод урахування статичних впливів на стійкість стелі порожнини, обумовлених вагою розміщеної над нею наземної будівлі з урахуванням НГСТ і сейсмічних впливів від проведення масових вибухів (МВ) на гіпсових кар'єрах;
- розробити рекомендації для гіпсових кар'єрів щодо параметрів підричних робіт, які б дозволили прогнозувати сейсмобезпеку кар'єрних вибухів стосовно об'єктів навколишнього середовища, які перебувають під охороною.

## 2. ВИКЛАДЕННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати дві задачі механіки гірських порід. Перша з них, статична, полягає в розрахунку деформацій, які не ведуть до порушення стійкості карстових порожнин в активній зоні наземних споруд. Для цього використовують розрахункову схему для системи у вигляді пружного лінійно-деформованого півпростору й шару скінченної товщини, а гранично допустимі значення деформацій визначають за СНиП 2.02.01-83 і ДБН В.2.1-10-2009 [1–3]. Друга задача, динамічна, формулюється заради забезпечення стійкості будівлі над карстом під дією створених кар'єрними вибухами сейсмічних хвиль у відповідності з «Правилами поведження...» й рекомендаціями ДСТУ 4704:2008 [4, 5].

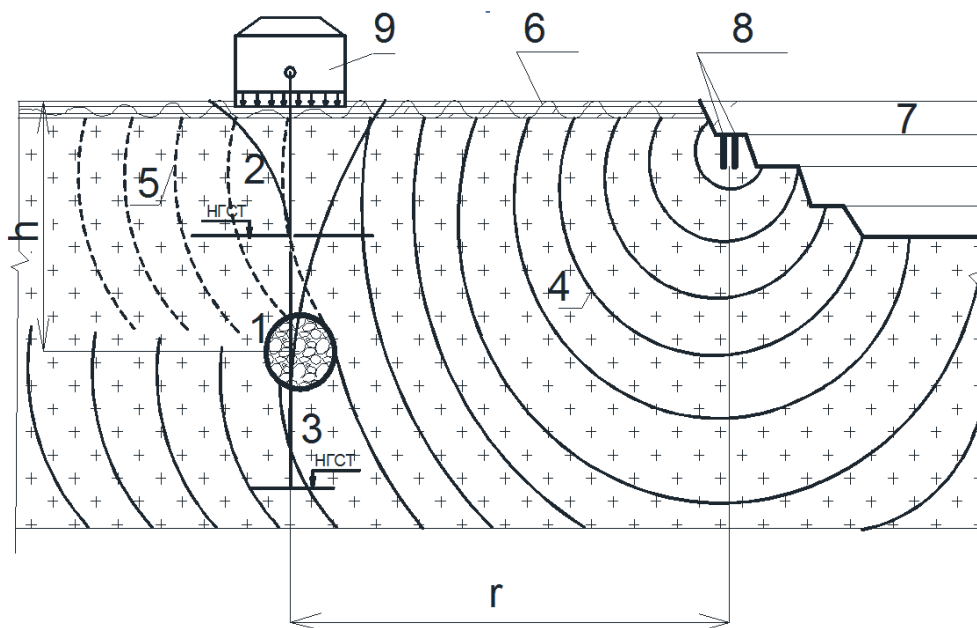


Рис. 1. Схеми поширення сейсмічних хвиль у гіпсовому масиві з карстовою порожниною, а також варіанти розміщення останньої відносно лінії НГСТ ( $h$  — глибина розташування карстової порожнини, а саме, висота товщі ґрунту над нею):

1 — карстова порожнина; 2, 3 — можливі розташування лінії НГСТ; 4 — фронт об'ємних хвиль; 5 — фронт відбитих від стелі порожнини об'ємних хвиль; 6 — поверхневі сейсмічні хвилі в м'яких ґрунтових масивах; 7 — кар'єр; 8 — смердловинні заряди з карстовими порожнинами на блоці, який підривається; 9 — будівля над порожниною

Поєднання згаданих двох задач дає можливість провести оцінку сумісного впливу сейсмічної дії й тисків ваги поверхневої будівлі та ґрунтів над карстовою порожниною на деформування стінок останньої. Характерну схему розміщення будівлі й карстової порожнини відносно НГСТ наведено на Рис. 1. На схемі також показані, зокрема, місця розташування кар'єру 7; блоку, який підривається 8; а також фронти поширення об'ємних 4, поверхневих 5 і відбитих об'ємних 6 хвиль.

### 2.1. Статична задача

При розв'язанні статичної задачі осідання основи фундаменту у відповідності з рекомендаціями СНиП і ДБН визначалось методом послідовного підсумовування осідань окремих шарів у межах товщі основи, а також в активній зоні деформацій основ до лінії НГСТ. Говорячи про карстові порожнини, зауважимо, що на практиці вони можуть знаходитись в активній зоні будинків вище або нижче лінії НГСТ (див. позиції 2 і 3 на Рис. 1 відповідно). Слід відзначити, що у випадку, коли наземна будівля 9 розташована над карстовою порожниною, яка знаходиться до лінії НГСТ 2, їхню сейсмобезпеку буде визначати сумісна дія статичних та динамічних впливів. Коли ж карст розташований нижче лінії НГСТ 3, слід враховувати лише динамічну дію.

Розв'язання статичної задачі проводилося згідно з критерієм стійкості карстових порожнин. При цьому враховувалось, що вертикальний гірський (природний чи/та побу-

товий) тиск на стінку порожнини від дією власної ваги порід визначається за формулою

$$P_K = \gamma h, \text{ кг/м}^2 \quad (1)$$

де  $\gamma$  — питома вага породи,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h = a/d$  — відносна висота стовпа гірської породи від карстової порожнини до земної поверхні. Тут  $a$  — абсолютна висота гірської породи, м;  $d$  — діаметр карстової порожнини, м.

При розрахунку осідання окремо розташованого фундаменту визначалась лінія НГСТ, у межах якої виконувався розрахунок основи по деформаціях. Для графічного знаходження НГСТ необхідно будувати епюри природного  $P_{\delta z}$  і додаткового  $P_{oz}$  тисків ґрунту.

Метод прогнозування сейсмобезпечних параметрів вибухів на стінку карстової порожнини базується на проведенні аналітичних і експериментальних досліджень дії сейсмічних хвиль, викликаних МВ у кар'єрі. З точки зору аналітики швидкість коливань ґрунту сейсмічної хвилі на стінках карстової порожнини визначається за формулою:

$$U_K^x = U_R^x e^{-1.7h/\lambda}, \text{ см/с}, \quad (2)$$

де  $U_K^x$  — швидкість коливань ґрунту сейсмічної хвилі на стінках карстової порожнини,  $\text{см/с}$ ;  $U_R^x$  — швидкість коливань для поверхневої хвилі в ґрунтовій основі будівлі над карстовою порожниною,  $\text{см/с}$ ;  $\lambda$  — довжина сейсмічної хвилі, м;  $h$  — відстань від карстової порожнини до будівлі на земній поверхні, м.

Напруження на стінці карстової порожнини можливо одержати, використавши відому залежність Ландау—Лівшица:

$$\sigma_K = U_K^x V_R \frac{\gamma}{g}, \text{ Па}, \quad (3)$$

де  $\sigma_K$  — напруга на стінці карстової порожнини, Па;  $V_R$  — швидкість поширення сейсмічних хвиль,  $\text{м/с}$ ;  $\gamma$  — об'ємна вага гіпсу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

Тоді умова рівності статичних й динамічних дій запишеться у вигляді

$$P_K = \sigma_K. \quad (4)$$

При розрахунку основ по деформаціях середній тиск під подошвою фундаменту не повинен перевищувати значення розрахункового тиску на основу  $R$  ( $\text{кН/м}^2$ ), визначене за формулою СНиП 2.02.01-83 й ДБН В.2.1.-10-2009:

$$R = \frac{\gamma_{c1} \gamma_{c2}}{k} [M_\gamma k_z b \gamma_{11} + M_q d_1 \gamma'_{11} + (M_q - 1) d_b \gamma'_{11} + M_c c_{11}], \quad (5)$$

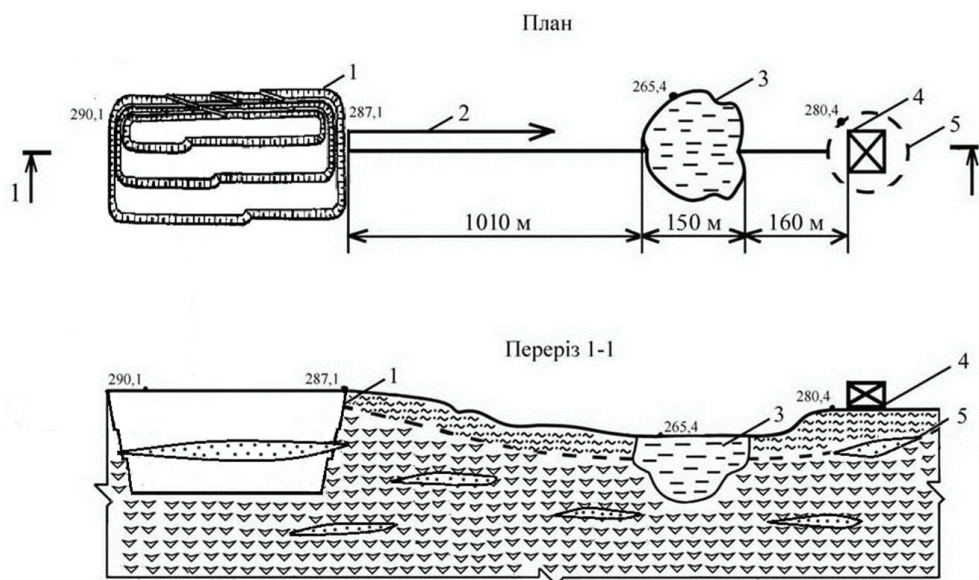
де  $\gamma_{c1}$  і  $\gamma_{c2}$  — коефіцієнти умов роботи, які залежать від (див. СНиП, Табл. 3);  $M_\gamma$ ,  $M_q$  і  $M_c$  — безрозмірні коефіцієнти, що залежать від кута внутрішнього тертя ґрунту  $\varphi$  (див. СНиП, Табл. 4);  $b$  — ширина подошви фундаменту, м;  $\gamma_{11}$  — усереднене розрахункове значення питомої ваги ґрунтів, що залягають нижче подошви фундаменту,  $\text{кН/м}^3$ ;  $\gamma'_{11}$  — те саме для ґрунтів, що залягають вище подошви;  $c_{11}$  — розрахункове значення питомого зчеплення ґрунту, що залягає безпосередньо під подошвою фундаменту,  $\text{кПа}$ ;  $d_1$  — глибина закладання фундаментів безпідвальних споруд від рівня планування або

приведена глибина закладання зовнішніх і внутрішніх фундаментів від підлоги підвалу;  $d_b$  — глибина підвалу від рівня планування до його підлоги;  $c_{11}$  — сила зчеплення ґрунту основи, МПа. Відмінний від одиниці коефіцієнт  $k = 1.1$  слід використовувати, якщо коли величини  $\varphi$  і  $c_{11}$  не отримані шляхом безпосереднього випробування в лабораторних умовах.

## 2.2. Динамічна задача

Визначення динамічних впливів від дії сейсмічних хвиль для забезпечення сейсмобезпеки будівлі й карстової порожнини під нею проводилося на основі рішення прямих задач експериментального плану з застосуванням закону динамічної подібності та у відповідності з рекомендаціями ДСТУ 4704:2008.

Важливою умовою забезпечення ефективності розробленого алгоритму розрахунку сейсмобезпеки будівлі й стійкості порожнини під нею є одержання даних експериментального характеру щодо ступеня поглинання інтенсивності сейсмічної хвилі в залежності від типів гірських порід на шляху її поширення. Промислові експерименти з визначення характеру поширення різних типів сейсмічних хвиль по характерних профілях проводились в умовах Щирецького гіпсового кар'єру ВАТ «Миколаївцемент». При цьому використовувалась методика багатоканальної профільної реєстрації коливань у напрямку кар'єр—будівля. Вимірювання проводились по профільних лініях протяжністю (1300...1450) м, а розрізи кожного з профілів проходили через карстові порожнини в різних азимутальних напрямках в місцях розташування будівель у с. Піски. Ескізну схему гірничо-геологічних умов відповідного профілю й схему взаємного розташування об'єктів при поширенні сейсмічних хвиль від МВ наведено на Рис. 2.



1 – кар'єр; 2 – напрямок поширення сейсмічних хвиль; 3 – озеро; 4 – житлова будівля; 5 – карст

Рис. 2. План і переріз характерної схеми профілю взаємного розташування об'єктів 3, 4 при поширенні сейсмічних хвиль від МВ у Щирецькому кар'єрі 1:

1 – кар'єр; 2 – напрямок поширення сейсмічних хвиль; 3 – озеро; 4 – житлова будівля; 5 – карст

Табл. 1. Характеристики СВХ, одержаних в районі с. Піски за профільними напрямками, подібними до зображених на Рис. 2

Відстань від блоку, що підраховується, до пункту спостереження, м	Тип сейсмоприймача	№ сейсмоприймача	Складова коливання	Об'ємна хвиля		Поверхнева хвиля			Пункти вимірів в основі будинків №
				Швидкість зміщення ґрунту, см/с	Частота коливань ґрунту, Гц	Швидкість зміщення ґрунту, см/с	Частота коливань ґрунту, Гц	Модуль вектору швидкості зміщення ґрунту, см/с	
1450	СМ-3	3	Z	0.0185	29	0.019	3.2	0.030	95*
1430	"	5	Z	0.0235	30	0.028	3.0	0.045	102*
1425	"	7	Z	0.0145	20	0.025	3.1	0.040	103*
1420	СМ-3В	10	X	0.025	20	0.030	2.9	0.040	106*
	"	8	Y	0.022	21	0.028	3.3		
	СМ-3	17	Z	0.022	23	0.026	3.1		
1350	"	9	Z	0.025	25	0.028	3.0	0.045	115*
1300	"	11	Z	0.030	31	0.029	3.1	0.046	120

Примітка: зірочкою позначені будинки, що знаходяться в зоні карстоутворення.

Висадження свердловинних зарядів здійснювалось з різними масами заряду вибухової речовини (ВР) у групі сповільнення з використанням неелектричної системи ініціювання зарядів. Тривалість ініціювання всіх свердловинних зарядів на кожному блоці становила до одної секунди, виходячи з потреб виробництва. За даними експериментальних досліджень у кожній точці установки сейсмоприймача визначались типи порід, масова швидкість (см/с) і амплітудно-частотний спектр коливань. Для запису параметрів сейсмічних хвиль, які виникали при МВ на Щирецькому гіпсовому кар'єрі ВАТ «Миколаївцемент», використовувалися сейсмоприймачі СМ-3 і СМ-3В, аналого-цифровий перетворювач сигналів АЦП-440 і реєстратор — персональний комп'ютер типу ноутбук. Апаратура пройшла перевірку в ДП «Укрметртестстандарт» України, і були одержані свідоцтва на відповідність кожного засобу вимірювальної техніки вимогам експлуатаційної документації.

Під час запису параметрів сейсмічних хвиль, які виникли від дії одного з характерних МВ у Щирецькому кар'єрі ВАТ «Миколаївцемент», сейсмоприймачі встановлювались по лінійному профілю довжиною 1450 м у напрямку блок 8 — крайній відносно кар'єру 7 житловий будинок 9 с. Піски, зазначений спеціалістами Інституту прикладних проблем екології, геофізики і геохімії як такий, що знаходився в зоні карстоутворення 2, 3 [5]. Типові для цього профілю схеми наведені на Рис. 1, а характеристики параметрів сейсмовибухових хвиль (СВХ) в районі сейсмовимірів с. Піски — у Табл. 1.

Дію коливань ґрунту на об'єкти, що охороняються, можливо оцінити модулем ве-



ктура швидкості коливань

$$|U| = \sqrt{U_X^2 + U_Z^2}, \quad (6)$$

де  $U_X$  і  $U_Z$  — максимальні значення швидкості коливань за її горизонтальною (радіальною в напрямку місце вибуху — пункт спостереження) і вертикальній складовими. Коливання по  $Y$ -складовій мають незначну величину й на величину вектора швидкості суттєво не впливають. Зазначимо, що амплітуда коливань по  $X$ -складовій знаходиться на за величиною  $Z$ -складовою зі співвідношення  $U_X = 1.25U_Z$  [6]. Таким чином, при проведенні експериментальних робіт достатньо одержати дані тільки для вертикальної складової, що є простішим і надійнішим, оскільки не потребує строгої орієнтації приладу по відношенню до місця вибуху і забезпечує стабільність результатів. Необхідна умова використання формули (6) — доступність значень швидкості коливань по всіх складових в межах половини періоду коливального процесу [6, 7].

З одержаної сейсмограми коливань ґрунту при МВ встановлено, що максимальні амплітуди коливань ґрунту належать поверхневим низькочастотним — порядку (3...4) Гц — хвилям. Для об'ємних високочастотних — порядку (16...30) Гц — хвиль амплітуда коливань у (1.5...3.0) рази менша, ніж для поверхневих хвиль. За результатами спектрального аналізу осцилограм коливань, зареєстрованих поблизу будівель з карстовими порожнинами під ними, встановлено, що енергоємним в районі с. Піски є діапазон низькочастотних коливань (2...4) Гц. Це пов'язано з далекою відстанню поширення сейсмічних хвиль, коли високочастотні коливання інтенсивно затухають, їх залежністю від закарстованості масиву гірських порід, а також від типу ВР і конструкції заряду.

Незважаючи на те, що частота коливань ґрунту в поверхневих хвилях практично співпадає з частотою власних коливань будівель, резонансних явищ не спостерігається, і розкачка охоронних будівель відсутня. Це можна пояснити коротким (близько однієї секунди) інтервалом дії коливань ґрунту в поверхневій хвилі на охоронні об'єкти.

Із динамічних характеристик СВХ у пунктах установки сейсмоприймачів у районі с. Піски, наведених у Табл. 1, видно, що під час МВ швидкість коливань ґрунту біля будинків у профілі вздовж вулиці становила від 0.019 до 0.03 см/с, що в (10...6) разів менше 1 балу коливань за Міжнародною шкалою MSK-64 (1 бал прирівнюється до 0.2 см/с), і не перевищувала норми, встановлені ДСТУ 4704:2008.

Також було проведено додаткові сейсмічні вимірювання масових швидкостей коливань, збуджених дією руху 40-тонного автомобіля із швидкістю 60 км/год уздовж вулиці з будинком № 106, біля якого були встановлені сейсмоприймачі. На Рис. 3 і 4 наведено осцилограму та спектрограми для цього експерименту по складових  $Z$  і  $X$  відповідно.

Із Рис. 3 видно, що інтенсивність коливання знаходиться на рівні, який виникав біля житлових будинків с. Піски при проведенні МВ, розташованому на відстані 1450 м до пунктів реєстрації (див. Табл. 1), а частотний спектр (Рис. 4) характеризується як низькими, так і високими частотами. Резонансних явищ не спостерігалось, тому що час дії коливального процесу в наведеній хвилі короткий і відбувався не більше 0.3 с.

Резерв для зменшення інтенсивності СВХ міститься в розробці оптимальної схеми короткосповільненого підривання (КСП), коли кожна свердловина на блоці ініціюється окремо з оптимальним інтервалом сповільнення — не менше половини періоду коливань хвилі. Фактично при здійсненні експериментального вибуху, згідно зі схемою комутації, з різницею у 10 мс підривались суміжні свердловини №№ 8 і 20, №№ 7 і 19 і т. д.

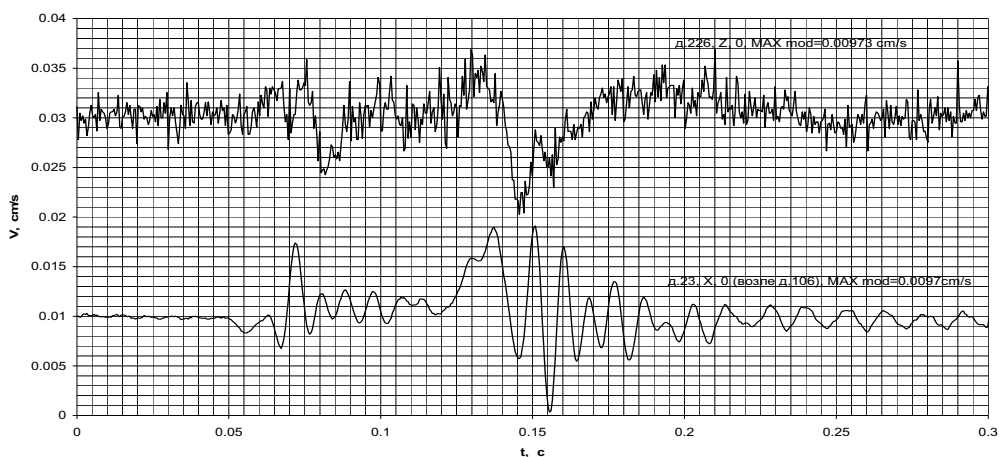
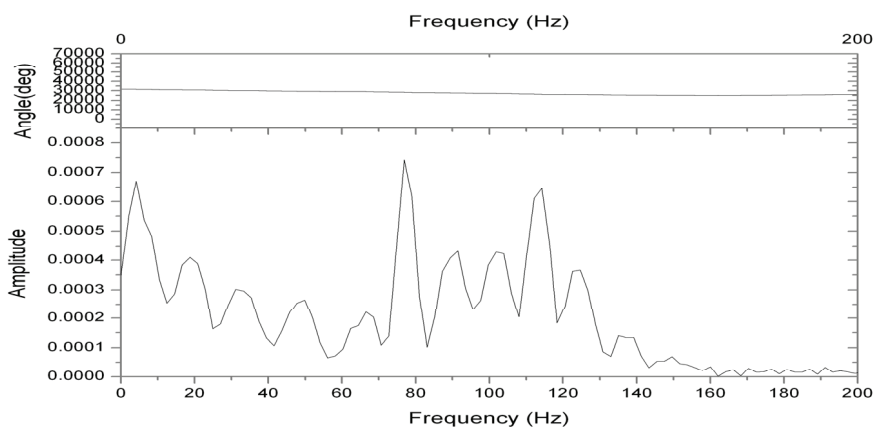
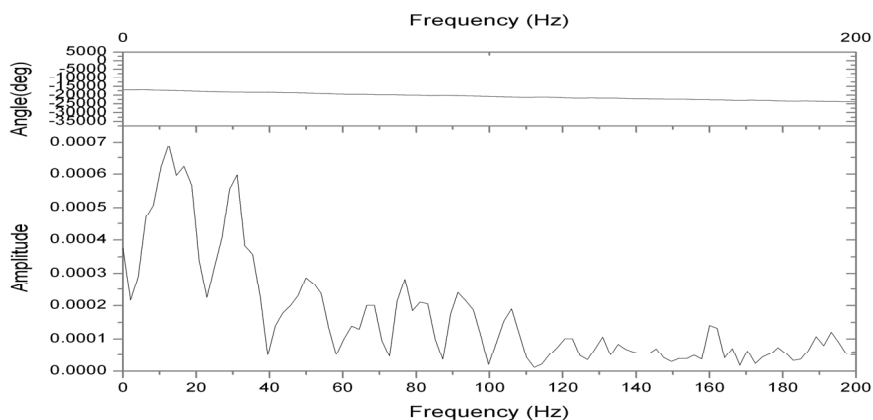


Рис. 3. Осцилограма сейсмічних коливань, збуджених проїздом 40-тонного автомобіля на відстані 20 м від будинку № 106 с. Піски із швидкістю 60 км/год



а



б

Рис. 4. Спектрограми сейсмічних коливань збуджених проїздом 40-тонного автомобіля на відстані 20 м від будинку № 106 с. Піски із швидкістю 60 км/год:

а – складова X; б – складова Z



Як показали заміри параметрів СВХ, зазначений проміжок часу між підриваннями свердловин майже в 1.5 рази менший за половини періоду коливань. Це дає підстави стверджувати, що фактично йде одночасне підривання двох свердловин, і сейсмоефект вибуху зростає.

Стосовно динамічних характеристик хвиль у віддалених районах розташування будівель над пустотами на прикладі Щирецького кар'єру встановлено, що під час МВ швидкість коливань ґрунту становить від 0.019 до 0.028 см/с, що майже на порядок нижче інтенсивності коливань в 1 бал. Рівень цих коливань можна зіставити з рівнем коливань, які виникають при проїзді вулицею автомобіля, а мешканці, які не знають про проведення вибуху, таку бальність можуть просто не відчувати.

У результаті розв'язання прямої задачі експериментального характеру за даними сейсмічних вимірювань в умовах Щирецького гіпсового кар'єру ВАТ «Миколаївцемент», а також у гіпсових кар'єрах ВАТ «Івано-Франківськцемент» і ПП «Скала-Інтер» на основі методу динамічної подібності були одержані емпіричні коефіцієнти пропорційності й показник степеню згасання (Табл. 2). Графіки залежності швидкості сейсмічних коливань від приведеної до заряду відстані та відстані до точки спостереження наведені на Рис. 5.

Табл. 2. Значення емпіричних коефіцієнтів пропорційності  $K$  й показника ступеня згасання хвилі  $n$ , а також емпіричні залежності для трьох гіпсових кар'єрів

Гіпсові кар'єри	$K$	$n$	Емпірична залежність
ВАТ «Івано-Франківськцемент»	$4160(U_R^Z)$	$2.1(U_R^Z)$	$U = 4160(r/Q_{гр}^{1/3})^{-2.1}$
ПП «Скала-Інтер»	$313(U_S^Z)$	$1.5(U_S^Z)$	$U = 313(r/Q_{гр}^{1/3})^{-1.5}$
ВАТ «Миколаївцемент»	$135(U_R^Z)$	$1.7(U_R^Z)$	$U = 135(r/Q_{гр}^{1/3})^{-1.7}$
Щирецький кар'єр	$130(U_R^Z)$	$1.7(U_R^Z)$	$U = 130(r/Q_{гр}^{1/3})^{-1.7}$

Примітка:  $(U_R^Z)$ ,  $(U_S^Z)$  — сейсмічні швидкості коливань ґрунту, одержані по координатній осі  $Z$  для типів хвиль  $R$  та  $S$  ( $R$  — поверхнева,  $S$  — поперечна).

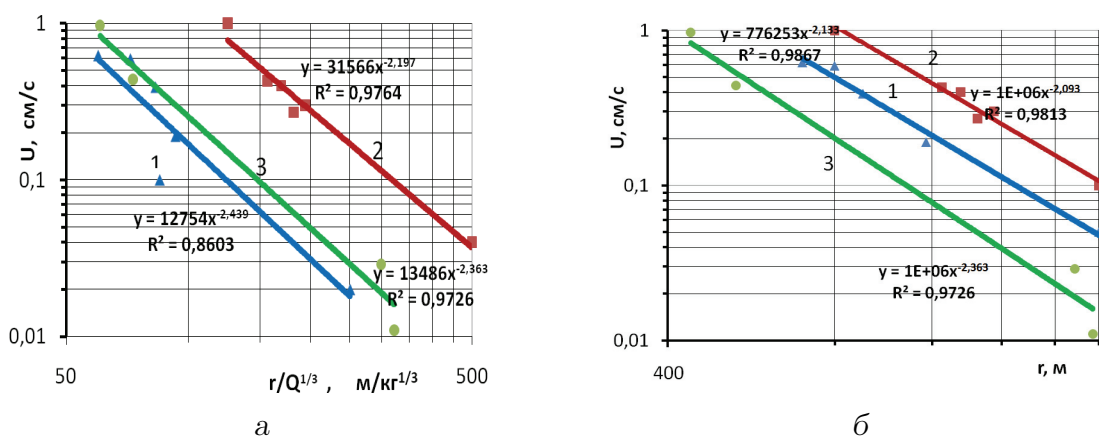


Рис. 5. Графіки залежності швидкості сейсмічних коливань:

а — від приведеної до заряду відстані; б — від відстані до точки спостереження;  
1 — кар'єр «Скала-Інтер»; 2 — кар'єр Щирецький; 3 — кар'єр «Івано-Франківськцемент»

### 3. ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для ефективного подрібнення закарстованих масивів порід на кар'єрах був застосований захищений патентом України [8] спосіб їх руйнування. Він включає буріння серії свердловин з визначенням потужності, витраченої обертачем бурового станка, структур їхніх геологічних колонок і розміщення в останніх подовжених зарядів ВР з хвилеводами та бойовиками під і над карстовою порожниною, засипку забивки, монтаж мережі короткосповільненого підривання. Конструкцію подовжених зарядів ВР у свердловині з карстовою порожниною наведено на Рис. 6.

Максимально допустима величина маси свердловинних зарядів ВР в групі ( $Q_{\text{доп}}$ , кг) при одночасному їх підриванні або відстань від місця вибуху до об'єкту, що охороняється ( $r_c$ , м) при одноразовому вибуху визначаються за допомогою цих емпіричних залежностей [9, 10]:

$$Q_{\text{доп}} = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{K} \right)^{3/n} r^3, \text{ кг} \quad r = \left( \frac{K}{U_{\text{доп}}} \right)^{1/n} Q_{\text{гр}}^{1/3}, \text{ м}, \quad (7)$$

де  $U_{\text{доп}}$  — швидкість коливань ґрунтової основи будівлі над карстовою порожниною; см/с,  $K$  — коефіцієнт умов підривання та поширення поверхневої хвилі;  $n$  — показник степеню згасання хвилі  $n = 1.7$  (див. Табл. 2).

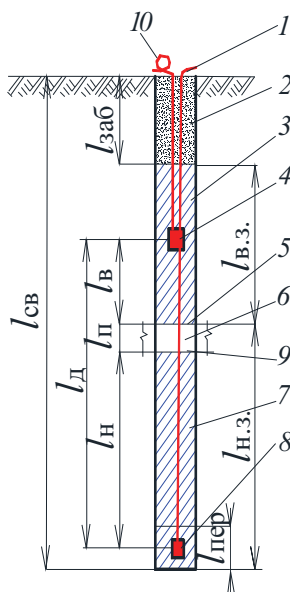


Рис. 6. Конструкція подовжених зарядів ВР у свердловині з карстовою порожниною:

- 1 — нитка хвилеводу нижнього бойовика 8; 2 — забивка; 3, 7 — верхній і нижній подовжені заряди ВР відповідно; 6 — карстова порожнина; 4, 8 — верхній і нижній бойовики відповідно; 5, 9 — стеліна й підшва карстової порожнини 6 відповідно; 10 — петля у хвилеводі верхнього бойовика 4 для додаткового інтервалу вповільнення;

$l_{\text{д}}$  — відстань від верхнього 4 до нижнього 8 бойовика, м;  $l_{\text{п}}$  — потужність карстової порожнини, м;  
 $l_{\text{н}}$ ,  $l_{\text{в}}$  — відстані від нижнього 8 й верхнього 4 бойовиків до підшви 9 та стеліни 5 карстової порожнини 6 відповідно, м;  $l_{\text{в.з.}}$ ,  $l_{\text{н.з.}}$  — довжини верхнього і нижнього подовжених зарядів відповідно, м.

Використавши формулу (7), Табл. 2 і величину допустимої швидкості коливань ґрунту в фундаменті будівлі ( $U_{\text{доп}}$ , см/с), визначені у відповідності ДСТУ4704:2008, можна розрахувати сейсдобезпечні для навколишнього середовища параметри МВ у кар'єрах. Одержані таким чином допустимі маси заряду в одній групі стосовно до охоронних об'єктів с. Піски при багаторазових МВ в Щирецькому кар'єрі представлені в Табл. 3.

Сейсдобезпека МВ забезпечувалась обмеженням допустимої маси заряду ВР при миттєвому підриванні в максимальній групі (див. Табл. 3), що дозволяло створити умови збудження сейсмовибухових хвиль, параметри яких — швидкість коливань ґрунтової основи будівлі й частота — знаходяться в межах допустимих норм. Достовірність розроблених рекомендацій можна вважати підтвердженою, оскільки за весь період не тільки не було зафіксовано будь-яких пошкоджень будівель (осипання штукатурки і т. ін.), але й нормалізувався психологічний стан місцевих жителів. Виходячи з того, що на протязі всього періоду проведення сейсмоконтролю при МВ у Щирецькому кар'єрі на території с. Піски не були порушені будівлі й карстові порожнини в діапазоні швидкостей зміщення частинок ґрунту (0.019...0.03) см/с, при визначенні допустимої маси зарядів для Табл. 3 за допустиму швидкість коливань ґрунту приймали величину  $U_{\text{доп}} = 0.03$  см/с,

Наведемо приклад розрахунку сумісної дії динамічних (викликані МВ сейсмічні хви-

Табл. 3. Допустимі маси заряду в одній групі в Щирецькому гіпсовому кар'єрі (стовпці 2, 4 — стосуються лише будівель, під якими карстові порожнини розташовані вище лінії НГСТ)

Відстань від підривного блоку до охоронного об'єкту, м	Допустима маса заряду в одній групі, кг		
	рекомендовані конструкції		традиційні конструкції
	для будівель з карстовими порожнинами під ними	для будівель без карстових порожнин під ними	для будівель з карстовими порожнинами під ними
1	2	3	4
900	220	380	150
950	260	390	170
1000	300	450	200
1050	350	525	230
1100	400	600	265
1150	460	690	300
1200	520	780	345
1250	590	880	400
1300	660	990	440
1350	730	1090	490
1400	800	1200	530
1450	900	1350	600
1500	1000	1500	670

Примітка: допустимі маси зарядів, визначені для сезонів робіт літо і зима, а для сезонів робіт весна і осінь їх необхідно зменшити в 1.2 рази.

лі) і статичних (тиск гірського масиву) факторів на стінку карстової порожнини під будинком № 106.

1. Гірський тиск на стінку карстової порожнини під дією власної ваги порід визначається за формулою (1). У нашому випадку він дорівнює

$$P_K = 0.076 \text{ МПа.}$$

2. Швидкість коливань ґрунту на стінках карстової порожнини, викликану дією МВ в кар'єрі, визначають за формулою (2):

$$U_K^z = 0.02243 \text{ см/с,}$$

де використано максимальне значення швидкості коливання ґрунту релеївської хвилі на земній поверхні біля розташованого над карстовою порожниною будинку № 106 (див. Табл. 1)  $U_R^z = 0.03 \text{ см/с}$ , одержане з осцилограми МВ.

3. Напруження на стінці карстової порожнини визначається за формулою (3) і становить

$$\sigma_K = 8 \cdot 10^{-4} \text{ МПа.}$$

4. Прийнявши відношення динамічних сил до статичних як 1.8, розрахуємо напруження, породжені дією сейсмічних хвиль на стінки карстової порожнини:

$$\sigma_g = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 1.8 = 14.4 \cdot 10^{-4} \text{ МПа.}$$

Таким чином, можна зробити висновок про те, що тиск гірського масиву на стінки карстової порожнини у 52 рази перевищує амплітуду сейсмічних хвиль на приведених відстанях (150...180) м/кг<sup>1/3</sup>. Наведені розрахунки на основі використання даних сейсмодіагностичної апаратури показали, що МВ в Щирецькому кар'єрі не впливають на стійкість карстових порожнин, а це, зокрема, забезпечує стійкість житловим будинкам, що знаходяться на поверхні масиву ґрунту над ними.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності статичної та сейсмічної стійкості стелини порожнини й розташованої над нею будівлі під час вибухів у закарстованому масиві гірських порід у кар'єрах. Запропонована методика відрізняється від відомих урахуванням не тільки спільної динамічних і статичних факторів разом із вологістю гірських порід, але й типом домінуючих хвиль та місцем розташування карстової порожнини по відношенню до нижньої лінії дії статичного тиску від мас гірської породи над стелиною порожнини.
2. Визначено сейсмобезпеку наземної будівлі й карстової порожнини під нею з урахуванням спільного впливу статичних і динамічних навантажень при дії об'ємних і поверхневих хвиль, збуджених масовими вибухами різної маси заряду вибухової речовини. Встановлено, що найбільшим є напруження на стінки порожнини від дії поперечної хвилі. При розташуванні будівлі вище лінії нижньої границі статичного тиску воно зростає на величину, яка дорівнює амплітуді динамічної складової.

3. Одержані результати є базовими для розробки інноваційних сейсмобезпечних технологій використання енергії вибуху при руйнуванні закарстованих масивів гірських порід під час проведення вибухових робіт на гіпсових кар'єрах України.
4. Сформульовані принципи й закономірності статичної та сейсмічної стійкості стелени порожнини і розташованої над нею будівлі під час вибухів у закарстованому масиві гірських порід у кар'єрах можуть бути застосовані в методичних підходах при підготовці персоналу до освоєння інноваційних сейсмобезпечних технологій, а також при розробці нових і доповненні існуючих Державних стандартів України.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Самедов А. М., Шелиховская Ю. П., Исмаилов Т. Усиление конструкции подземных сооружений на участках с ожидаемыми карстовыми провалами // Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”, серія Гірництво. — 2008. — Т. 17. — С. 74–81.
- [2] Толмачев В. В., Троицкий Г. М. Определение расчетного размера карстовых провалов при проектировании фундаментов на закарстованных территориях // Основания фундаментов и механика грунтов. — 1983. — № 2. — С. 22–24.
- [3] Печеркин И. А. Вопросы изучения карста в инженерных целях // Инженерная геология. — 1981. — № 5. — С. 77–80.
- [4] Бойко В. В., Воротеляк В. Є., Воротеляк Г. А., та ін А. О. К. Національний стандарт України. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки. — 2009.
- [5] Геофізичні дослідження карстонебезпечної ділянки площею 500 300 м в с. Піски Пустомитівського району Львівської області. — Київ : Інститут прикладних проблем екології, геофізики і геохімії, 2008. — 56 с.
- [6] Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2002. — 832 с.
- [7] Динамические процессы в геосферах. Сборник научных трудов Института динамики геосфер РАН. — Москва : ГЕОС, 2013. — Т. 4. — 268 с.
- [8] Спосіб вибухового руйнування складноструктурних масивів гірських порід : Патент 93235 Україна / В. В. Бойко, С. Ю. Богуцький, Д. В. Хлевнюк, Н. І. Жукова ; Інститут гідромеханіки НАН України ; — 25.09.2014.
- [9] Бойко В. В., Воротеляк В. Є., Воротеляк Г. А., Кузьменко А. О. Національний стандарт України. Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд. — 2010.
- [10] Бойко В. В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України. — Київ : ТОВ “Видавництво Сталь”, 2012. — 234 с.

## REFERENCES

- [1] A. M. Samedov, Y. P. Shelikhovskaya, and T. Ismailov, “Strengthening the construction of underground structures in areas with expected karst failures,” *Visnik Nacional'nogo tehničnogo unіversitetu Ukraїni “Kiїvs'kij politehničnij ĩnstitut”*. Seriâ Girnictvo, vol. 17, pp. 74–81, 2008.
- [2] V. V. Tolmachev and G. M. Troitsky, “Determination of the estimated size of karst dips in the design of foundations in karst areas,” *Osnovaniya Fundamentov i Mehanika Gruntov*, no. 2, pp. 22–24, 1983.
- [3] I. A. Pecherkin, “Problems of studying karst for engineering purposes,” *Inženernaâ geologiâ*, no. 5, pp. 77–80, 1981.
- [4] V. V. Boyko, V. Y. Vorotelyak, G. A. Vorotelyak, and A. A. Kuzmenko, “National Standard of Ukraine. Carrying out of industrial explosions. Seismic Safety Standards,” 2009.
- [5] “Geophysical investigations of karst-dangerous zone, 500x300 m in area, in Pisky village of Pustomyty district of Lviv region,” tech. rep., Institute of Applied Problems of Ecology, Geophysics and Geochemistry, Kyiv, 2008.
- [6] L. P. Orlenko, ed., *Physics of explosion*. Moscow: Fizmatlit, 2002.
- [7] *Dynamic processes in geospheres. Proceedings of the Institute of Geosphere Dynamics of RAS*, vol. 4. Moscow: GEOS, 2013.
- [8] V. V. Boyko, S. Y. Bogutskii, D. V. Hlevnyuk, and N. I. Zhukova, “A method of explosive destruction of rocks with complex structure,” 2014. Patent of Ukraine no. 93235.
- [9] V. V. Boyko, V. Y. Vorotelyak, G. A. Vorotelyak, and A. A. Kuzmenko, “The National Standard of Ukraine. Industrial explosions. Methods of determining the actual seismic strength of buildings and structures,” 2010.
- [10] V. V. Boyko, *Problems of seismic security of explosive activity in Ukrainian quarries*. Kyiv: LLC “Stal’ Publishing”, 2012.

**В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк,  
О. Н. Чала, Н. И. Жукова**

**Исследование эффективных и сейсмобезопасных параметров  
взрывных работ на карьерах в условиях закарстованных  
породных массивов**

Проанализированы известные теоретические и экспериментальные исследования, касающиеся методов расчета параметров взрывных работ с учетом свойств разрушающихся пород (в частности, пород сложной структуры). Рассмотрены разработанные конструкции зарядов и способы их инициирования, а также варианты различных схем короткозамедленного взрывания, способных обеспечить качественное



измельчение массивов пород в очаге взрыва с одновременным соблюдением допустимого уровня сейсмобезопасности в зоне зданий (в том числе, расположенных над карстовыми полостями в зоне влияния карьера). Обоснованы сейсмобезопасные параметры массовых взрывов на гипсовых карьерах. Исследованы особенности распространения различных типов волн в закарстованном массиве горных пород от очага взрыва к месту взаимодействия их с наземными объектами и карстовыми полостями под ними. Получены эмпирические коэффициенты и усовершенствована формула расчета сейсмобезопасной массы зарядов взрывчатого вещества при короткозамедленных взрывах скважинных зарядов с неэлектрической системой инициирования. Предложенное соотношение отличается от известных учетом статической и динамической составляющих нагрузки, вызванной поперечной волной. Кроме того, принимается во внимание наличие карстовых полостей, расположенных в активной зоне дома до (или ниже) линии нижней границы статического давления. Проанализирована специфика управляемого детонирования скважинных зарядов, разделенных карстовой полостью, с целью смыкания последней. Дальнейшее развитие получили представления о распространении в закарстованном массиве пород сейсмических колебаний от массовых взрывов в карьерах, а также об их взаимодействии с поверхностными зданиями и карстовыми полостями под ними, расположенными выше нижней границы статического давления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** статическая и сейсмическая устойчивость, карьер, допустимые массы зарядов, взрывчатое вещество, сейсмоизмерительные работы, массовые взрывы, закарстованный грунтовый массив, карстовые полости, скорость колебаний, сейсмобезопасность

**V. V. Boiko, A. A. Kuzmenko, O. M. Chala,  
T. V. Hlevnyuk, N. I. Zhukova**

**Studying the effective and seismic safe parameters of imploding works  
in quarries under the conditions of karsted rock mass**

The known theoretical and experimental studies on methods for calculating the parameters of imploding works with the allowance for properties of collapsing rocks (in particular, rocks of complex structure) are analyzed. The developed designs of charges and methods for their initiation are considered, as well as the variants of various short-delay blasting schemes capable for ensuring high-quality grinding of rock mass in the explosion center with simultaneous maintaining of acceptable level of seismic safety in the area of buildings (including those located over the karst cavities in quarry influence zone). The seismic safety parameters of mass explosions in gypsum quarries are substantiated. The peculiarities of various types of waves propagation in the karsted rock mass from the explosion source to the place of their interaction with ground objects and karst cavities under them are investigated. The empirical coefficients are obtained along with the improving of the formula for calculating the seismically safe mass of explosive charges for short-delayed explosions of borehole charges with a non-electric initiation system. The proposed relation differs from the known ones by the fact that it considers the static and dynamic components of the load caused by the transverse wave. Moreover, the presence of karst cavities located in the active area of the house up to (or below) the line of the lower limit of static pressure is taken into account. The specificity of controlled detonation of borehole charges separated by a karst cavity with the aim of closing the latter is analyzed. The concepts of seismic vibrations from mass

explosions in quarries, as well as their interaction with the buildings on the surface and karst cavities beneath them located above the lower limit of static pressure, are further developed.

*KEY WORDS: static and seismic stability, quarry, admissible masses of charges, explosive material, seismic measurements, mass explosions, cartilage soil massif, karst cavity, vibration velocity, seismic safety*