

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

**МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ**  
**з курсу «Прикладна геофізика»**

Київ-2018

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”

## МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

за курсом “Прикладна геофізика”  
для студентів спеціальності 184 «Гірництво»  
спеціалізацій  
”Геотехнічне і міське підземне будівництво ”,  
”Розробка родовищ та видобування корисних копалин”

Київ 2018

Методичні рекомендації за курсом “Прикладна геофізика” для студентів спеціальності 184 «Гірництво» / Уклад.: В.Г.Кравець, В.В.Бойко К.: Інформаційний ресурс. 2018. - с.

Навчальне видання  
“Прикладна геофізика”  
для студентів спеціальності 184  
”Гірництво”,

Укладачі:  
Кравець В.Г., Бойко В.В.

Відповідальний редактор: *В.Г.Кравець*, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: *Н.С.Ремез*, д-р техн. наук, проф.

За редакцією укладачів

## ЗМІСТ

Визначення термінів та понять.....	5
Тема 1. НОРМАТИВНІ ТА МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ СЕЙСМОБЕЗПЕКИ ВИБУХОВИХ РОБІТ .....	7
Лекція 1 Передмова. Класифікація території України за тектонічною структурою.....	7
Лекція 2 Методика вимірювання параметрів сейсмічних хвиль.....	11
Лекція 3 Визначення фактичних параметрів сейсмовибухової хвилі.....	16
Лекція 4 Норми сейсмічної безпеки та типи сейсмічних хвиль.....	19
Тема 2 ОСОБЛИВОСТІ СЕЙСМІЧНОЇ ДІЇ ВИБУХУ В РЕАЛЬНОМУ ГІРСЬКОМУ МАСИВІ.....	23
Лекція 5 Дія вибуху циліндричного заряду в анізотропному масиві порід.....	23
Лекція 6 Зв'язок сейсмічного ефекту з спектральним складом пружних коливань.....	27
Лекція 7 Трансформація амплітудно-частотного спектра масових вибухів в умовах геолого-тектонічних структур.....	31
Лекція 8 Сейсмостійкість бортів кар'єру за критерієм прискорення.....	35
Лекція 9 Сейсмостійкість бортів кар'єру за критерієм масової швидкості коливань.....	42
Лекція 10 Оцінювання типу пружних хвиль за припустимою деформацією бортів кар'єрів.....	46
Тема 4 СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	52
Лекція 11 Сейсмобезпека непошкоджених будівель.....	52
Лекція 12 Теоретичні підстави сейсмобезпеки експлуатованих будівель.....	56
Лекція 13 Сейсмічна стійкість ослаблених тріщинами будівель.....	61
Лекція 14 Прогноз сейсмостійкості об'єктів з різною конфігурацією фундаментів.....	65
Література.....	69

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ ТА ПОНЯТЬ

Наведені нижче терміни вживаються у такому значенні.

- **допустима швидкість сейсмічних коливань ґрунту** – швидкість, за якої повністю гарантовано збереження будівель і споруд, а вірогідні локальні їх деформації не перевищують прогнозовані;
- **охоронювані об'єкти** – будівлі, споруди, інженерні, природні та ін. об'єкти, яким повинна бути повністю гарантована збереженість, а вірогідність локальної їх деформації не перевищує допустимих норм;
- **масовий вибух (на відкритих роботах)** – вибух змонтованих у загальну вибухову мережу двох і більше свердловинних, котлових або камерних зарядів, а також одиничних зарядів у зарядних виробках протяжністю більше 10 м;
- **вибухова речовина (ВР)** – хімічна сполука або суміш, що здатна за певних умов до дуже швидкого самопоширюваного хімічного перетворення з виділенням тепла та великої кількості газоподібних продуктів;
- **сейсмічна хвиля (сейсмічна вибухова хвиля (СВХ))** – поперечна, подовжена, об'ємна, поверхнева (Релея) хвилі, які утворюються в середовищі від вибуху заряду вибухової речовини;
- **вибухові матеріали (ВМ)** – матеріали, засоби ініціювання вибуху, виробу та пристрої, які містять вибухові речовини;
- **вибухові роботи** – комплекс організаційних і технічних заходів, пов'язаних з підготовкою та проведенням вибухів;
- **бал** – умовна одиниця вимірювання, що характеризує інтенсивність сейсмічного впливу вибуху заряду з певними кількісними та якісними показниками на будівлі, інженерні споруди, природні об'єкти, живі істоти та ін.;
- **сейсмічна стійкість** – здатність будинків та споруд протистояти сейсмічним впливам без втрати експлуатаційних якостей;
- **сейсмоапаратурні комплекси** – сукупність основних пристроїв для запису і відтворення сейсмічної інформації та допоміжних пристроїв, яка призначена для визначення параметрів сейсмічних коливань ґрунту або конструкції споруди;
- **охоронна зона (сейсмонезпечна зона)** – зона, намічена за результатами розрахунків під час проектування вибухових робіт, у якій відсутнє перевищення граничних нормативів інтенсивності пружних хвиль;
- **сейсмонезпечна зона** – зона навколо джерела вибуху, в якій перевищуються граничні нормативи інтенсивності пружних хвиль;

- **сейсдобезпечна межа** – межа, намічена за результатами розрахунків під час проектування вибухових робіт, поза якою відсутнє перевищення граничних нормативів інтенсивності пружних хвиль, або ізолінії допустимих граничних нормативів інтенсивності пружних хвиль;
- **зміщення ґрунту** – відстань, на яку перемістилась частка ґрунту під дією пружних коливань;
- **масова швидкість або швидкість зміщення ґрунту** – швидкість зміщення частинки ґрунту у сейсмічній хвилі;
- **прискорення зміщення ґрунту** – зміна у часі швидкості зміщення частки ґрунту у сейсмічній хвилі;
- **період коливання** – час, за який частка ґрунту проходить повний цикл коливання;
- **частота коливань** – число повних коливань часток ґрунту (періодів) за одну секунду;
- **ізосейми** – лінія навколо джерела вибуху з однаковими значеннями масової швидкості або прискорення коливань, побудована за результатами розрахунків або апаратурних вимірів.

# Тема 1. НОРМАТИВНІ ТА МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ СЕЙСМОБЕЗПЕКИ ВИБУХОВИХ РОБІТ

## Лекція 1

### Передмова. Класифікація території України за тектонічною структурою

Територія нашої країни зазнає значних техногенних навантажень, особливо в промислово розвинених регіонах. Велика кількість промислових об'єктів, зокрема підприємств гірничовидобувної промисловості, створюють небезпеку для навколишнього середовища і здоров'я людей.

В гірничому виробництві одним з основних технологічних процесів, що негативно впливають на навколишнє середовище, є підривні роботи. Вибух витрачає значну енергію на руйнування гірських порід до певної крупності. Одночасно він забруднює повітря токсичними газами, створює пилову хмару та породжує систему сейсмічних хвиль, що загрожують навколишнім спорудам та порушують стійкість гірничих виробок, природних і техногенних елементів рельєфу.

Пропонований курс «Прикладна геофізика» охоплює ряд проблемних питань, пов'язаних з дослідженням стану сейсмічної безпеки вибухової справи в кар'єрах України, передових досягнень в промисловій сейсміці, сейсмозахисту різних типів охоронних об'єктів. Він включає наступні напрямки досліджень в промисловій сейсміці:

- вивчення геолого-тектонічної структури територій гранітів Українського кристалічного щита (УКЩ) і вапняків Прикарпатського прогину і проведення їх класифікації для прогнозування сейсмічної інтенсивності вибуху;
- вивчення характеру розповсюдження навколо вибуху сейсмічних хвиль в масивах, де анізотропія проявлена в вигляді закономірної системи паралельних тріщин;
- дослідження коливань системи "грунт-споруда" і визначення впливу частотних характеристик будівель на їх сейсмостійкість з оцінкою зміни інтенсивності сейсмічних коливань при їх переході від ґрунтової основи в фундамент будівлі і далі на саму будівлю;
- визначення особливостей поширення сейсмо-вибухової хвилі у багатошаровому масиві гірських порід;
- визначення сейсмостійкості уступів м'яких порід та розроблення методики перерахування крутизни укосу залежно від фізико-механічних властивостей розкритих порід;
- оцінка сейсмічного ефекту багатоблокових масових вибухів з неелектричною системою ініціювання зарядів ВР для визначення сейсмотехнічних масштабів підривних робіт.

Основний об'єм будівельної сировини в Україні видобувається в кар'єрах, розташованих у межах Українського кристалічного щита (УКЩ) і вапняків Прикарпатського прогину. В результаті сейсмічних явищ, викликаних промисловими вибухами, в густонаселених районах виникає ряд проблем. Для їх

розв'язання необхідно виявити сейсмобезпечні зони на основі геолого-тектонічного аналізу території України шляхом визначення параметрів тектонічних порушень у місцях, призначених для розробки порід [1].

Для оцінки неоднорідності гранітів УКЩ, де розташовані кар'єри будівельної сировини, вивчена геолого-тектонічна характеристика території України (рис. 1.1).

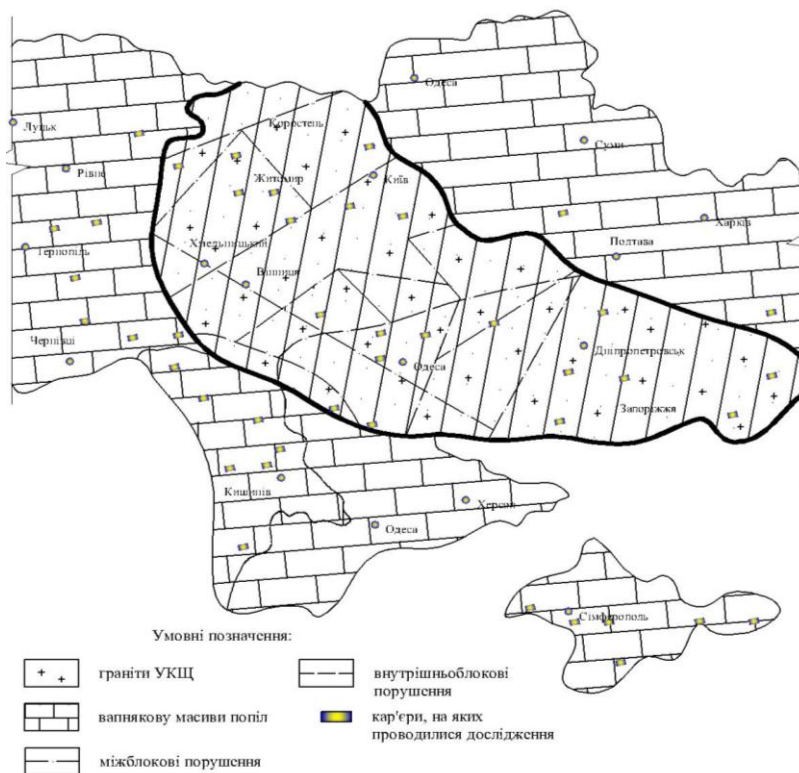


Рис.1.1. Геолого-тектонічна карта території України

Вивчення геолого-тектонічної карти на протязі багаторічних досліджень у кар'єрах, визначення структури масивів УКЩ дозволило визначити характер анізотропії масивів, виявити міжблокові і внутрішньблокові порушення. Дані вимірювань і результати їх обробки наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

### Параметри порушеності гранітів УКЩ

Область	Площа гранітів, $S$ , тис. км <sup>2</sup>	Загальна довжина міжблокових порушень, $L_{\text{бл}}$ , тис. км	Загальна довжина внутрішньблокових порушень, $L$ , тис. км	$S/L$ , тис. км
Житомирська	29,9	0,45	0,583	51,29
Хмельницька	4,55	0,21	0,225	20,22



Вінницька	26,5	0,469	0,918	28,87
Київська	26,3	0,3	0,325	80,92
Черкаська	18,65	0,2	0,27	69,07
Кіровоградська	24,6	0,112	0,14	175,71
Миколаївська	11,3	0,135	—	-
Одеська	4,5	0,12	—	-

На основі комплексу наукових досліджень розроблено класифікацію УКЩ і вапняків Прикарпатського прогину за ознакою наявності анізотропних властивостей на місцевості, де розташований кар'єр і прилегла до нього територія проживаючого населення. Класифікація містить три класи і два підкласи (рис. 1.2).

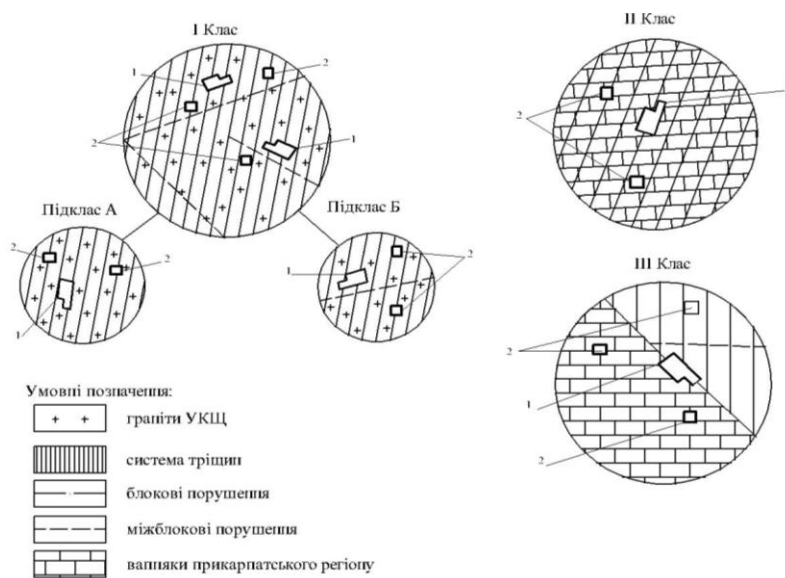


Рис. 1.2. Схема класифікації території України на класи і підкласи: 1 – кар'єрне поле; 2 – об'єкт, який охороняється

I клас - граніти Українського Кристалічного Щита:

підклас А – території з закономірно орієнтованою системою паралельних тріщин в зоні гірничого підприємства та прилеглих об'єктів, які охороняються;

підклас Б – підклас А з наявністю блокових та міжблокових розломів.

II клас – територія вапняків Прикарпатського прогину з системою вертикальних та пластових тріщин, на якій розташований кар'єр і прилегла зона з об'єктами, які охороняються.

III клас – територія, розташована в регіоні на межі I-го та II-го класів.

З приведеної класифікації встановлено напрямок досліджень характеру розповсюдження сейсмічних хвиль навколо джерела вибуху в масивах, де анізотропія проявлена у вигляді закономірної системи паралельних тріщин.

Отримані результати досліджень можуть бути використані при розробці сейсмобезпечної техніки промислових і спеціальних вибухових робіт на територіях з інженерними і природними об'єктами, які потребують сейсмотехніки.

*Контрольні питання*

1. *Небезпечні чинники вибуху в гірництві*
2. *Поясніть термін «сейсмобезпека»*
3. *Обґрунтуйте потребу вивчення тектоніки гірничих регіонів України*
4. *Що означає термін «анізотропія»?*
5. *Дайте визначення поняттю «сейсмобезпечна зона»*
6. *Назвіть класи порід за анізотропією*
7. *Назвіть підкласи гранітів за тектонікою.*

## Лекція 2

### Методика вимірювання параметрів сейсмічних хвиль

Інструментальні записи сейсмовибухових хвиль в промисловій сейсміці проводяться при вибуху одиничних і системи зарядів. Обрана апаратура для вивчення сейсмічних властивостей гірського масиву повинна забезпечувати не тільки вимірювання швидкості коливань, але і програму спектрального аналізу коливального процесу системи "джерело вибуху – гірський масив – об'єкт" у взаємозв'язку з його сейсмостійкістю, технічним станом тощо.

Головною метою сейсмічних вимірювань є встановлення закономірностей взаємодії сейсмовибухових хвиль в системі з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунта. За результатами цих вимірювань визначаються у різних діапазонах частоти масові швидкості коливань.

Завдання вимірювань:

- а) оперативний контроль впливу сейсмовибухових хвиль на охоронні об'єкти;
- б) статистичне накопичення даних про параметри коливань (швидкості і частоти) і використання їх при коректуванні існуючих масштабів вибуху;
- в) вибір безпечних рівнів коливань для об'єктів;
- г) використання даних сейсмічних параметрів короткосповільненого вибуху системи свердловинних зарядів ВР для розробки рекомендацій з визначення сейсмобезпечних параметрів вибухових робіт на різних ділянках кар'єрного поля та переносу цих даних на райони з подібними гірничо-геологічними і технічними умовами.

Сейсмічні спостереження дають можливість кількісно оцінити рівень коливань, а потім розробити рекомендації з безпечної експлуатації об'єктів, які охороняються в умовах ведення вибухових робіт. Значення критерію сейсмобезпеки не повинно перевищувати припустимих величин за нормативами.

Дані інструментальних вимірювань уніфікуються за єдиною формою і поділяються на наступні групи.

*I. Загальні відомості.*

*II. Характеристика порід у місці установки сейсмоприймачів, параметри ВР.*

А. Характеристика покриваючих порід.

Б. Параметри вибуху кожного блоку і характеристика порід, які підриваються.

В. Параметри сейсмічних хвиль.

На рис.2.1 зображено елементи вимірювальної системи.

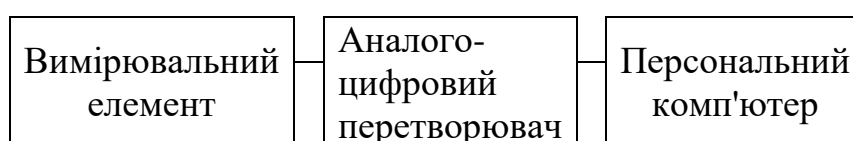


Рис. 2.1. Елементи інформаційного каналу

Як вимірюючий елемент інформаційного каналу приймають електромеханічні датчики маятникового типу СМ-3 і СМ-3В.

Принцип дії приладу полягає в наступному: корпус приладу з магнітом жорстко кріпиться до досліджуваного об'єкту і повторює його рухи. Маятник із закріпленою на ньому котушкою прагне залишитися в стані спокою. Через відносний рух магніту і котушки в останній наводиться електрорушійна сила (ЕРС), або напруга, величина якої пропорційна швидкості руху. Зміна цієї ЕРС і фіксується у вузлі реєстрації.

Наступним елементом інформаційного каналу є аналого–цифровий перетворювач ADA1406, що працює з частотами 400 КГц і 100 КГц.

Останнім елементом вимірювального каналу є ПК.

Для вимірювання параметрів сейсмовибухових хвиль використовується як мінімум 7 сейсмічних датчиків, розташованих по профілю. Для встановлення координат датчиків використовується супутникова система.

Максимальний вплив від коливального процесу може оцінюватися модулем повного вектора швидкості коливань

$$[u] = \sqrt{(u^x)^2 + (u^y)^2 + (u^z)^2}, \quad (2.1)$$

якщо швидкість коливань часток ґрунту по складовим коливань досягає максимуму в один час у межах зміщення фаз на  $90^\circ$ , що трапляється дуже рідко.

Сказане підтверджується фрагментом осцилограми (рис. 2.2), де представлені записи швидкості зміщення ґрунту по трьом складовим (X, Y, Z) у спільному пункті спостереження двох апаратурних комплексів.

З рис. 2.2 видно, що різниця в часі вступу максимальних амплітуд за складовими коливань майже дорівнює періоду коливань ( $T = 0,029$  с), що відповідає зміщенню фаз в  $360^\circ$ . Тому модуль повного вектора швидкості не може визначатися за формулою (2.1). У розглянутому випадку модуль повного вектора швидкості визначається за лінією 1–1 (рис. 2.2), що відповідає часу вступу складових коливань 0,153 с, або за лінією 2–2 (час вступу коливань 0,178 с). При цьому максимальний вплив від коливального процесу за формулою (2.1) становить 1,9 см/с і 1,66 см/с відповідно.

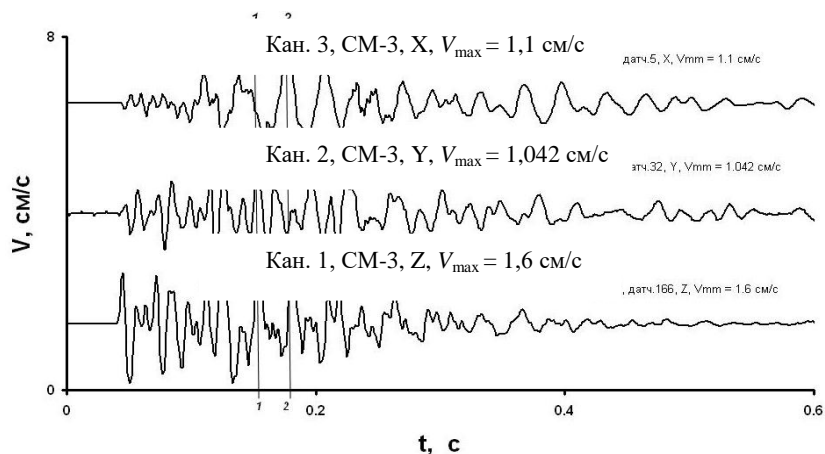


Рис. 2.2. Характерна осцилограма масового вибуху за сейсмодатчиками в напрямку X, Y, Z

Як приклад можливостей апаратного комплексу проведемо дослідження впливу масових вибухів №1 і №2 на опори ЛЕП, розташованих на відстанях 380 м і 440 м від блоків, які підриваються відповідно. Сейсмоприймачі СМ-3 встановлювались на ґрунтовій основі опори ЛЕП і на її конструкції на висоті 1,5 м. В табл. 2.1 наведені максимальні значення швидкості зміщення часток ґрунту.

Таблиця 2.1  
 Максимальні значення швидкості зміщення часток ґрунту (см/с)

Місце установки сейсмоприймача	Вибух №1	Вибух №2
Конструкція опори	0,64 см/с	0,45 см/с
Ґрунт основи опори	0,85 см/с	0,37 см/с

Аналізуючи дані табл. 2.1, можна помітити, що при вибуху №1 швидкість коливання ґрунту більша, ніж швидкість коливання конструкції опори. При вибуху №2 – навпаки.



Рис. 2.3. АЧХ сейсмічних коливань, записаних сейсмоприймачами встановленими на ґрунті (а) і на конструкції опори (б) при вибуху №1

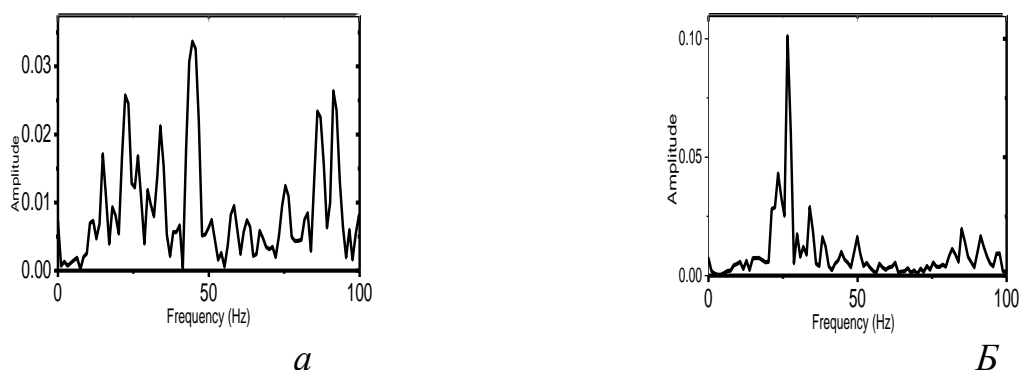


Рис. 2.4. АЧХ сейсмічних коливань, записаних сейсмоприймачами, встановленими на ґрунті (а) і на конструкції опори (б) при вибуху №2

Аналізуючи АЧХ, представлені на *рис. 2.3, б* і *2.4, б* можна відзначити, що вони для конструкції опори при вибухах №1 і №2 мають яскраво виражений пік амплітуди коливань на частоті 26,5 Гц, що є частотою власних коливань конструкції опори ЛЕП. Яскраво виражених амплітудних максимумів на частотах, близьких до 26,5 Гц серед сейсмічних коливань, зафіксованих на ґрунтовій основі опори при вибуху №1, не було (*рис. 2.4, а*). Тому резонансних явищ при взаємодії СВХ ґрунтової основи опори із її конструкцією не відбувалося і масова швидкість коливань елементів конструкції опори виявилася меншою, ніж ґрунтової основи, як наслідок дисипативних втрат енергії при передачі хвильових явищ на елементи конструкції опори.

При вибуху №2 АЧХ сейсмічних коливань, зафіксованих у ґрунтовій основі опори (*рис. 2.4, а*), містить амплітудний максимум на частоті, близькій до частоти власних коливань конструкції опори (22,5 Гц), тому спрацював ефект резонансного явища між СВХ і елементами конструкції опори, що привело до збільшення швидкості коливання в порівнянні зі швидкістю переміщення часток ґрунту в 1,22 рази.

У результаті проведених досліджень отримане підтвердження того, що при дослідженні дії СВХ на охоронний об'єкт необхідно проводити спектральний аналіз коливального процесу, який зареєстрували всі сеймомодатчики. Показано, що модуль повного вектора швидкості зміщення часток ґрунту за значеннями

складових коливань (X, Y, Z) визначається тільки в той самий час, коли відбувається коливальний процес.

*Контрольні запитання*

*1. Вимоги до виміральної апаратури*

*2. Мета сейсмічних вимірювань*

*3. Основне завдання вимірювань*

*4. Зобразіть схему виміральної апаратури*

*5. Принцип роботи сейсмічного датчика*

*6. Принцип встановлення координат датчиків*

*7. Формула модуля повного вектора швидкості коливань*

*8. Поясніть причину зміни параметрів коливань при переході з ґрунтової основи до об'єкту*

### Лекція 3

#### Визначення фактичних параметрів сейсмовибухової хвилі

За допомогою сейсмометричної апаратури вимірюють швидкість та період коливань ґрунту біля фундаменту будівлі і порівнюють їх з допустимою швидкістю коливань ґрунту для будівлі. Фактична сейсмічна стійкість споруд, які підлягають збереженню, визначається співвідношенням періодів коливань ґрунту та споруди.

Реєстрація коливань в першу чергу виконується у місцях максимального наближення вибухових робіт до будинків і споруд, які підлягають захистові. Вимірювання проводяться біля фундаменту будівлі для визначення закономірності поширення сейсмовибухової хвилі від осередку вибуху до об'єкту. Вимірювання виконуються одночасно із застосуванням двох груп сейсмоприймачів (по три на групу) у кожній точці, які фіксують коливання у 3-х напрямках: за двома горизонтальними складовими ( $x$ ,  $y$ ) та одною вертикальною ( $z$ ). За результатами обробки отриманої сейсмограми визначаються параметри сейсмовибухової хвилі - зміщення або швидкість зміщення ґрунту, або прискорення часток ґрунту, період коливання та частоту коливань.

Опрацювання даних включає:

- визначення параметрів сейсмічних коливань за сейсмограмами;
- швидкість коливань ( $V$ ) обчислюється за формулою:

$$V = \frac{2\pi \cdot A}{T}, \quad (3.1)$$

де  $A$  – амплітуда зміщення, см,  $T$  – період коливань, с.

Період коливань визначається із сейсмограми за позначками часу між піками максимальних амплітуд коливань;

Швидкість коливань за кожною складовою ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ), в сантиметрах за секунду, обчислювалась відповідно за формулами:

$$V_x = \frac{2\pi A_x}{10T_x}; \quad V_y = \frac{2\pi A_y}{10T_y}; \quad V_z = \frac{2\pi A_z}{10T_z}, \quad (3.2)$$

де  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  – періоди коливань за кожною складовою, с.

Результуючу амплітуду зміщення часток ґрунту ( $A$ ), швидкості коливань ( $V$ ), прискорення ( $a$ ), обчислюють за формулами:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}; \quad (3.3)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad (3.4)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (3.5)$$

Сейсмічне навантаження ( $G$ ), в кілограмах, на будівлю обчислюють за формулою:



$$G = P \frac{a}{g} K_c \eta_k, \quad (3.6)$$

де  $P$  – маса споруди, кг,

$a$  – прискорення коливань ґрунту біля фундаменту споруди, см/с<sup>2</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, см/с<sup>2</sup>;

$K_c$  – коефіцієнт динамічності (коефіцієнт сприйняття коливань будівлею).

Коефіцієнт динамічності визначають із сейсмограми коливань ґрунту і будівлі або за формулою

$$K_c = 1 / \sqrt{\left(1 - \frac{T_0^2}{T^2}\right)^2 + \lambda^2 \cdot \frac{T_0^2}{T^2}}, \quad (3.7)$$

де  $T_0$  – період власних коливань споруди;

$T$  – період переважаючих коливань ґрунту, що визначають за сейсмограмою,

$\lambda$  – декремент затухання власних коливань будинків і споруд. Значення декремента затухання наведено в табл. 3.1 ;

$\eta_k$  – коефіцієнт форми деформації,  $\eta_k = 0,96$ .

Таблиця 3.1

Значення декремента затухання для різних типів будинків і споруд

Тип будинку	$T_0,$ с	$\lambda$	$H/b$
Одноповерховий цегляний будинок	0,20	0,25	0,28
Житловий двоповерховий цегляний будинок	0,26	0,17	0,88
Житловий чотирьохповерховий цегляний будинок	0,29	0,12	1,30
Триповерховий цегляний будинок із залізобетонним каркасом	0,24	0,20	0,86
Житловий п'ятиповерховий панельний будинок	0,30	–	1,20
Гараж для самоскидів (двоповерховий,	0,50	–	0,985

багатопролітний, цегляний, підсилений)			
---	--	--	--

Фактичну сейсмічну стійкість будинків і споруд визначають шляхом порівняння швидкості коливань, яку обчислено згідно формули (2.3) із допустимою швидкістю коливань ґрунту біля фундаментів будівель і споруд згідно існуючих норм.

Роботи проводяться відповідно протоколу вимірювань, який містить наступну інформацію:

- 1) посилання на методичку;
- 2) назву та адресу вимірювальної лабораторії;
- 3) дату та місце проведення вимірювань;
- 4) місце проведення вибухових робіт;
- 5) дату і номер протоколу вимірювань;
- 6) результати вимірювань;
- 7) підпис відповідальних за результати вимірювань;
- 8) інші показники, якими можливо вплинути на результат вимірювання;
- 9) будь-які операції чи будь-які умови, що виникли під час визначання та не установлені у цьому стандарті, що могли б вплинути на результати вимірювань.

Необхідно регулярно перевіряти апаратуру для отримання достовірних результатів. Частоту перевіряння визначає кожна організація, яка проводить вимірювання і атестована у встановленому порядку.

Перевірянню повинно підлягати наступне:

- а) сейсмоприймачі;
- б) багатоканальний цифровий реєструючий осцилограф;
- в) апаратура для оброблення сейсмограм (комп'ютер з програмним забезпеченням).

Контрольні запитання

1. *Вимірювані параметри коливань*
2. *Першочергові місця вимірювань параметрів коливань*
3. *Поясніть зв'язок періоду та частоти коливань*
4. *Формула для визначення швидкості коливань*
5. *Як визначається період коливань?*
6. *Наведіть вид формул для визначення результуючих параметрів коливань*
7. *Формула для визначення сейсмічного навантаження*
8. *Формула для коефіцієнта динамічності*
9. *Що таке «декремент затухання» ?*
10. *Як визначають сейсмічну стійкість будівель?*

## Лекція 4

### Норми сейсмічної безпеки та типи сейсмічних хвиль

Зростання масштабів будівництва зумовлює необхідність збільшення кількості гірничо-видобувних підприємств або розширення територій уже існуючих. При цьому межі кар'єрів поступово наближаються до цивільних та промислових споруд. Зростає руйнуючий вплив сейсмічних хвиль від промислових вибухів.

В цих умовах необхідно постійно контролювати шкідливу дію вибухів для збереження цілісності будівель. Оцінку вибухів і регулювання інтенсивності сейсмічної дії здійснюють керуючись величиною максимальної швидкості коливань хвиль. Швидкість має бути меншою за допустиму величину, взяту із існуючих норм. Фахівці намагаються побудувати такі схеми підривання, при яких при однаковій масі заряду будуть мінімальні показники інтенсивності дії сейсмічних хвиль на споруди, що знаходяться поблизу. Але для побудови сейсдобезпечних меж навколо місця вибуху необхідно поряд з порівняльним аналізом впливу різних схем підривання здійснювати аналіз сейсмограм за типами хвиль (поверхневих, об'ємних поздовжніх і поперечних, хвиль Лява). Небезпеку для конкретного об'єкта несуть хвилі, що за спектральним складом близькі до частотних характеристик споруди.

Такі роботи потребують знання допустимого рівня сейсмічного впливу (швидкості коливань ґрунту в основі об'єкту) на навколишні промислові, цивільні або природні об'єкти. Визначення бальності коливань на стан будівель і споруд під час вибухів проводиться по Шкалі інтенсивності сейсмічних коливань, яка наведена в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Шкала інтенсивності сейсмічних коливань під час вибухів

Характеристика коливань	Бали	Швидкість коливань, см/с
Колівання реєструють тільки прилади	1	менше ніж 0,2
Колівання відчуються в окремих випадках за тихої погоди	2	0,2–0,4
Колівання відчуються деякими людьми або яким відомо про проведення вибуху	3	0,4–0,8
Колівання відчують багато людей, деренчання скла	4	0,8–1,5
Опадання побілки, пошкодження старих будівель	5	1,5–3,0
Тонкі тріщини в штукатурці; пошкодження будівель, які мали деформації	6	3,0–6,0
Пошкодження будівель, які перебували в задовільному стані: тріщини в штукатурці, падіння кусків штукатурки, тонкі тріщини в стінах, тріщини в печах і трубах	7	6,0–12,0
Значні пошкодження будівель: тріщини в несучих конструкціях і стінах, великі тріщини в перегородках, падіння пічних труб, обвали штукатурки	8	12,0–24,0
Руйнування будівель: великі тріщини в стінах, розшарування кладки, падіння окремих частин стін	9	24,0–48,0
Великі руйнування і обвали будівель і споруд	10–12	> 48,0

Найбільш прийнятним критерієм сейсдобезпеки будівель при вибухових роботах є швидкість зміщення часток ґрунту в їх основі [2-4]. Ушкодження споруд настає в тому випадку, коли швидкість зміщення часток ґрунту ( $U$ , см/с) перевищує допустиму її величину [ $U$ ]. Особливо небезпечним становище стає, коли частота коливань ґрунтової основи будівлі наближається до її власної.

Використання вказаного критерію на практиці призводить до завищення гранично допустимих норм, коли визначення допустимої інтенсивності коливань ґрунту в основі споруди проводиться без врахування технічного стану будівель (ослабленість тріщинами) і частотного спектру системи "ґрунт-будівля". Через завищення граничних норм припускається помилка з визначення сейсмобезпечних параметрів масових вибухів у кар'єрах. Це призводить до подальшого розвитку існуючих та утворення нових тріщин у навколишніх будівлях.

Сейсмостійкість гірських масивів визначають відсутністю залишкових деформацій під час проходження сейсмічних вибухових хвиль. Критерієм сейсмостійкості гірської породи є відносна пружна деформація ( $E_0$ ), яку вираховують за формулою:

$$E_0 = U/V_p, \quad (4.1)$$

де  $U$  – швидкість коливань часток ґрунту сейсмічної хвилі, м/с;

$V_p$  – швидкість розповсюдження сейсмічної хвилі, м/с.

Допустиму відносну пружну деформацію гірських порід для інженерних споруд, що в них містяться, встановлюють відповідно класу споруд, їх характеристики та терміну експлуатації (табл. 4.2).

**Таблиця 4.2**

**Допустима відносна пружна деформація гірських порід для інженерних споруд, які в них містяться**

Клас споруд	Характеристика споруди і термін її експлуатації	Допустима відносна пружна деформація
1	Особливо відповідальні споруди тривалого терміну експлуатації від 10 до 15 років: гідротехнічні тунелі, стволи шахт, капітальні штольні, камери подрібнення, рудничні двори	0,0001
2	Відповідальні споруди з терміном експлуатації від 5 до 10 років: обхідні і транспортні тунелі гідротехнічних споруд, надкамерні цілики, квершлагги, уступи кар'єрів і відвалів	0,0002
3	Споруди, що їх використовують короткочасно (від 1 до 5 разів): камери, штреки, уступи	0,0003
4	Невідповідальні споруди, що їх використовують одноразово: очисні блоки, робочі уступи, робочі борти кар'єрів тощо	0,0005

Згідно "Єдиних правил безпеки при вибухових роботах" [5] визначення безпечних відстаней при короткосповільненому вибуху  $N$  зарядів загальною масою  $Q$  з часом сповільнення між вибухами кожного заряду не менше 20 мс проводиться за формулою:

$$r_c = K_r K_c \frac{\alpha}{N^{1/4}} Q^{1/3}, \quad (4.2)$$

де  $K_r$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей ґрунтів в основі охоронної споруди;

$K_c$  – коефіцієнт, який залежить від типу охоронної будівлі;

$\alpha$  – коефіцієнт, який залежить від показника дії вибуху;

$N$  – кількість груп зарядів, шт.;

$Q$  – загальна маса зарядів, кг.

Цей розрахунок безпечної відстані стосується тільки будинків, що знаходяться у задовільному технічному стані. За наявності порушень у будинках (тріщин у стінах і т.п.) безпечна відстань, розрахована за формулою (4.2), має бути збільшена не менше ніж удвічі.

Наведемо результати розрахунків для наступних умов застосування системи короткосповільненого ініціювання: вибухи загальною масою 12000–16000 кг вибухової речовини, у зоні 300–700 м розташований завод з переробки сировини на щебінь та населений пункт. Ґрунти в основі будинків – не обводнені піски та глини, глибиною понад 10 м. Відповідно:

$K_r = 12$ ;  $K_c = 2$ ;  $\alpha = 1$ .

Безпечні відстані для різної кількості груп зарядів  $N$  та загальної маси зарядів  $Q$  розраховані за формулою (4.2) зі збільшенням удвічі, оскільки будинки в незадовільному технічному стані (табл. 4.2 ).

Таблиця 4.2

### Сейсмічно безпечні відстані

$Q$ , кг	4000	6000	10000	12000	16000
$R_c \times 2$ , м ( $N = 6$ шт.)	480	658	660	700	770
$R_c \times 2$ , м ( $N = 15$ шт.)	398	440	526	550	614
$R_c \times 2$ , м ( $N = 20$ шт.)	360	400	480	560	570

Аналіз даних табл.4.2 свідчить, що для вибуху масою 16000кг із застосуванням 6 ступенів сповільнення мінімальний розмір небезпечної відстані становитиме 770 м, а при 20-ти ступенях сповільнення – 570 м. Хоча останнє помітно зменшує розміри небезпечної зони, але змонтувати схему короткосповільненого вибуху з 20-ма групами, коли загальна маса ВР мала, практично неможливо. Такі вимоги може виконати неелектрична система ініціювання типу "Нонель", яка останніми роками широко впроваджується в кар'єрах України. Однак вплив способу ініціювання на прогноз сейсмічного ефекту короткосповільненого підривання до сьогодні науковцями у цій галузі не переглядався.

Тому слід зазначити, що отримані розміри сейсмобезпечних відстаней є наближеними.

Із аналізу існуючих літературних даних і нормативних документів, визначено, що найбільшу небезпеку викликає той тип хвиль, який за частотним спектром при максимальних значеннях амплітуд коливань найбільш близький до спектра власних коливань об'єкта, що охороняється. Помилковою є оцінка сейсmobезпеки охоронного об'єкту тільки по одному із типів хвиль – поверхневих. Враховуючи, що при вибухах напруження та відносні деформації об'єктів прямо пропорційні швидкості коливань, сейсмічну небезпеку будуть створювати ті типи хвиль, в яких ці параметри будуть максимальними.

#### *Контрольні запитання*

- 1. Який параметр характеризує інтенсивність сейсмічної хвилі?*
- 2. Що таке допустимий рівень сейсмічного впливу?*
- 3. Перелічіть основні типи сейсмічних хвиль*
- 4. Поясніть поняття бальності коливань*
- 5. Назвіть особливо небезпечну ситуацію для споруд*
- 6. Поясніть, чому в нормах сейсмічної безпеки наводяться завищені показники.*
- 7. Продемонструйте, як визначається сейсмічна стійкість гірського масиву.*
- 8. Які параметри характеризують технічний стан споруди?*
- 9. Як впливає кількість груп сповільнення на сейсмічний ефект?*
- 10. Для яких будинків потрібно подвоїти розрахунковий радіус безпечної зони?*

## Тема 2 ОСОБЛИВОСТІ СЕЙСМІЧНОЇ ДІЇ ВИБУХУ В РЕАЛЬНОМУ ГІРСЬКОМУ МАСИВІ

### Лекція 5

#### Дія вибуху циліндричного заряду в анізотропному масиві порід

Теоретичні дослідження характеру розподілу хвильового поля від вибуху заряду ВР базується на моделі середовища, наближеній до реального анізотропного масиву. Вихідною моделлю є однорідне нескінченне середовище з системою паралельних тріщин. Фізико-механічні властивості заповнювача тріщин відрізняються від властивостей самого середовища. Детонація заряду по його довжині приймається миттєвою, а сейсмічна хвиля розглядається на значній відстані від місця вибуху.

Оскільки всі типи хвиль, які збуджуються вибухами промислових ВР, характеризуються малою амплітудою, а задачею є встановлення тільки якісної картини розподілу сейсмічних хвиль навколо вибуху, то в рішенні використовують теорію звукової хвилі [6].

За допомогою рівнянь, що описують поширення сейсмічних хвиль в тріщинуватій породі, отримано характер розподілу ізосейсм навколо вибуху (рис.5.1).

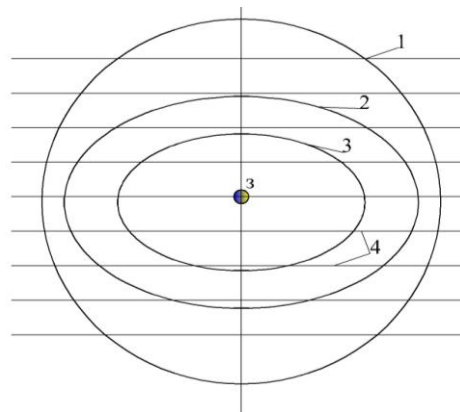


Рис.5.1 Результати розрахунку ізосейсм у тріщинуватому масиві навколо вибуху: 1–3 – ізосейми; "O" – місце вибуху; 4 – система паралельних тріщин

Дослідження руйнуючої і сейсмічної дії вибуху одиночних циліндричних зарядів ВР проводились в межах масивів гранітів 1-го (підклас А) та вапняків 2-го класів відповідно класифікації кар'єрів. Теоретичні і експериментальні дослідження дії вибуху були зосереджені на гранітних та вапнякових масивах, де анізотропія проявлена, як система закономірно орієнтованих тріщин.

Закономірності, що характеризують механічний рух анізотропної породи навколо вибуху, досліджувались у двох областях: у зоні незворотних деформацій (параметри воронки руйнування) і в наступній за нею пружній

області (параметри сейсмічних хвиль). З першою зоною ми пов'язуємо поняття сейсмічного випромінювача (зруйнована зона, яка є джерелом сейсмічної енергії). При цьому сейсмічні хвилі від вибуху виникають у результаті звільнення енергії при незворотній деформації породи.

Головним джерелом інформації про необхідні руйнівні параметри, хвильовий рух і їх зміну з відстанню навколо вибуху є форма і розміри видимої воронки руйнування, а також сейсмограми, що реєструють коливання в різних азимутальних пунктах установки сеймоприймачів. Обробка сейсмограм дає можливість одержати ряд характерних кінематичних силових, амплітудно-частотних показників коливання різних типів анізотропної породи для встановлення форм ізосейсм.

Перша зона цікава інтенсивністю і рівномірністю руйнування та параметрами ізосейсм на її зовнішній межі, що визначають нерівномірність формування коливань у віддалених ділянках масиву. Володіючи цією інформацією, можливо встановити взаємозв'язок руйнівної і сейсмічної дії з міцністю і пружними характеристиками масивів порід.

Схему установки сейсмічних датчиків навколо заряду наведено на рис.5.2.

Радіус зони руйнування визначався в місцях установки датчиків, далі у плані будувалась форма зон руйнування. Наступний етап - реєстрація коливань по різних напрямках, яка дозволяє визначити максимальну масову швидкість в кожному типі сейсмічної хвилі (поздовжної  $P_p$ , поперечної  $P_s$  та поверхневої  $R$ ) залежно від дирекційного кута.

За різницею в часі отримання вступних сигналів в точках  $N_1-N_7$  у хвилях, збуджених вибухом одиночного заряду, визначалась швидкість поширення сейсмічних хвиль в різних азимутальних напрямках.

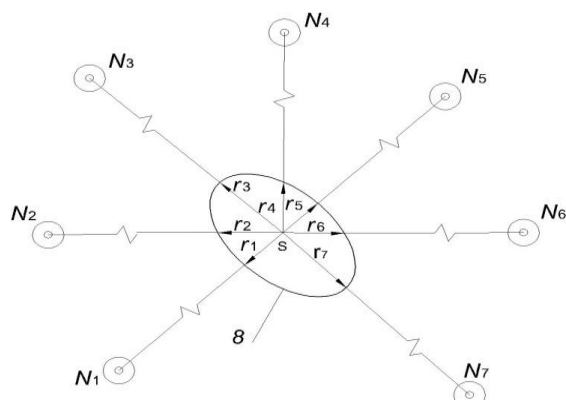


Рис.5.2 Схема установки сейсмоприймачів з визначення зон руйнування та ізосейсм:  $S$  – заряд;  $N_1 \dots N_7$  – точки розташування датчиків; 8 – теоретичний контур зони руйнування;  $r_1 \dots r_7$  – значення радіусів зони руйнування;

За результатами вимірів будувались на плані радіуси зони руйнування та ізолінії швидкостей коливань, частот і енергій коливань (рис. 5.3-5.6).



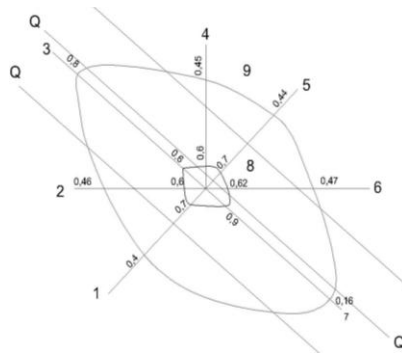


Рис.5.3 Взаємозв'язок воронки руйнування 8 і зони ізосейсм 9.  $Q-Q$  – напрямок основної системи тріщин

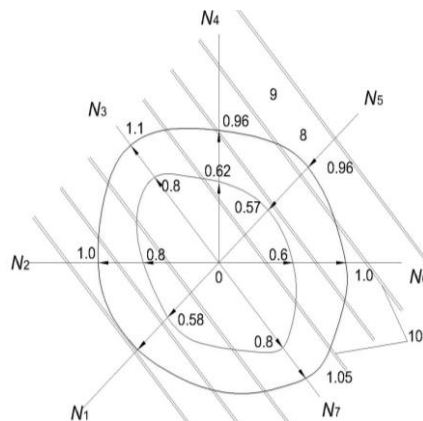


Рис.5.4 Параметри зони руйнування від вибуху подовженого заряду ВР масою 0,63 кг: 8- в граніті I класу підкласу А, 9 – у вапняку II класу; 10 – система тріщин; 0,57...1,1 – числові значення радіусу зони руйнування в метрах

По кожному вибуху шпурового заряду визначали коефіцієнт анізотропії міцності порід  $k_a$ , рівний відношенню максимальної довжини радіуса воронки руйнування ( $r_{max}$ ) до мінімального ( $r_{min}$ ).

Обробка результатів апаратурних вимірювань дозволяла одержати дані для кожного типу хвиль за масовими швидкостями коливань у різних профільних напрямках. За цими даними визначалось відхилення форми ізосейсм від кола. Воно характеризується коефіцієнтом сейсмоанізотропії  $k_{sa}$ , що дорівнює відношенню максимальних значень масових швидкостей коливань до мінімальних, отриманих на однакових відстанях від осередку вибуху.

Аналізуючи рис. 5.4, бачимо, що параметри зони руйнування при вибуху заряду ВР залежать від типу гірських порід, акустичної жорсткості і ширини тріщин. У вапняку розміри зони руйнування в 1,3 рази більші, ніж в граніті. Поглинаюча дія тріщини стосовно вибухової хвилі приводить до того, що по напрямку більшої частоти тріщин радіус зони руйнування менший. Тому геометрія зони руйнування має мінімальні розміри по головній осі анізотропії тріщинуватості.

Аналіз розрахункових значень коефіцієнта анізотропії міцнісних властивостей

порід показує, що значення  $k_a$ , зі збільшенням тріщинуватості росте. Для гранітів значення  $k_a$ , становить 1,2–1,4, для вапняків – 1,05–1,16.

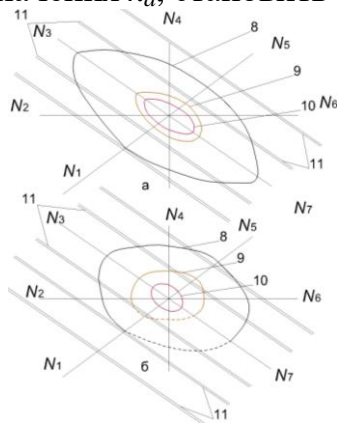


Рис. 5.5 Зони ізосейсм 8, 9, 10 отримані навколо вибуху подовженого заряду ВР відповідно наведеній масі заряду 0,089; 0,041 і 0,027 кг/м

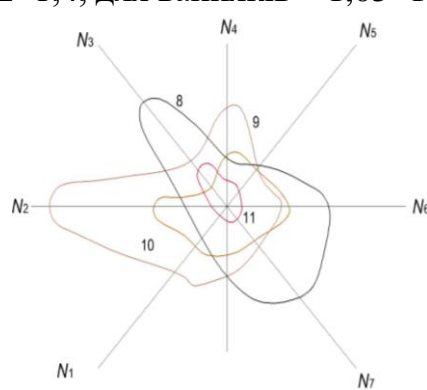


Рис. 5.6 Взаємозв'язок зон ізоліній енергії на різних діапазонах частот з воронкою руйнування: 8–10 – ізолінії енергії в поверхневій, повздовжній і поперечній хвилях; 11 – зона воронки руйнування

Відмінність форм зон руйнування від кола, отримані від вибухів одиночних зарядів ВР, свідчить про анізотропію гірського масиву відносно пружних його властивостей. Тому можна припустити, що в такому масиві масові швидкості коливань будуть дирекційними величинами, і кожний напрямок анізотропного середовища необхідно буде характеризувати індикатрисою швидкості – просторовою фігурою, яка окреслює форму ізосейсм.

### Контрольні питання

1. Дайте характеристику теоретичній моделі масиву
2. Поясніть, що ви розумієте під поняттям «ізосейсма»
3. Поясніть, що розуміється під анізотропією реального масиву
4. Дайте пояснення терміну «сейсмічний випромінювач»
5. Які параметри характеризують форма і розміри воронки вибуху?
6. Дайте визначення коефіцієнта анізотропії
7. Поясніть поняття сейсмічної анізотропії
8. Назвіть наближені значення коефіцієнта сейсмічної анізотропії для граніту і вапняку

## Лекція 6 Зв'язок сейсмічного ефекту з спектральним складом пружних коливань

В подальшому аналіз коливального процесу проводився за його амплітудно - частотним спектром, що дозволяє визначити смугу частот, які несуть основну енергію сейсмічних коливань.

При спектральному аналізі сейсмічних хвиль від вибуху поодинокого циліндричного заряду для трьох типів хвиль по кожному з напрямків встановлення датчиків визначали амплітудно-частотний спектр і середню масову швидкість коливань (рис. 6.1).

Аналіз амплітудно-частотних характеристик на рис. 3.11 свідчить про те, що при зміні дирекційного кута відносно напрямку поширення тріщин в межах 0–90° гармоніки у напрямку уздовж тріщин основні піки максимальних амплітуд зрушені в область високих значень (повздовжні хвилі), перпендикулярно тріщинам ( $\varphi = 90^\circ$ ) – в область низьких гармонік (поверхневі хвилі), а в напрямку, розташованому під кутом ( $\varphi = 45^\circ$ ) до тріщин максимальні амплітуди в спектрі займають проміжне значення (поперечні хвилі).

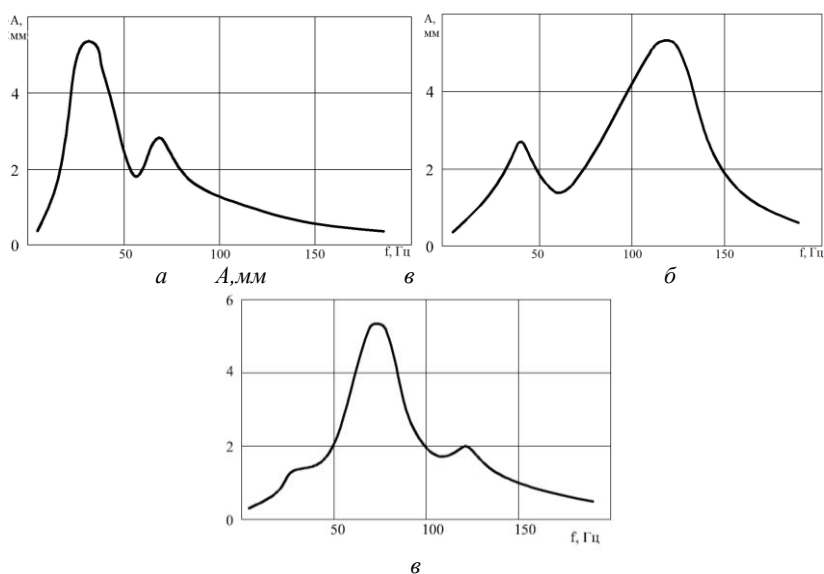


Рис.6.1 Амплітудно-частотні спектри вибуху подовженого заряду ВР: а, б, в – перпендикулярно, уздовж і під кутом 45° до тріщин відповідно

Такий розподіл частотного спектра по характерних напрямках навколо вибуху свідчить про те, що кожний тип сейсмічних хвиль по різному реагує на середовище, де анізотропія гірського масиву проявлена в вигляді системи паралельних тріщин. У результаті цього спостерігається анізотропія сейсмічних виявлень навколо вибуху. Згідно з даними теоретичних і експериментальних досліджень ізосейми навколо вибуху мають форму, наближену до еліптичної асиметрії. Це обумовлено тим, що в анізотропному масиві в різних напрямках

провідність кожного типу сейсмічних хвиль не однакова і залежить як від кількості тріщин на шляху поширення коливань, так і від ширини розкриття тріщин.

У напрямку більшої частоти тріщин їх поглинаюча дія стосовно подовженої і поперечної хвиль з високочастотними складовими коливань приводить до того, що на однаковій відстані навколо вибуху у цьому напрямку розповсюджуються поверхневі хвилі, які несуть низькі гармоніки, а сейсмічні коливання характеризуються найменшим ступенем загасання.

Слід зазначити, що хоча уздовж тріщин спостерігається найбільший ступінь загасання подовжньої і поперечної сейсмічних хвиль, у даному напрямку значення масової швидкості максимальні і змінюються в діапазоні 0,7–1,15 см/с. Остання ситуація пояснюється найкращою провідністю сейсмічних коливань у напрямку уздовж тріщин з перевагою у високочастотних складових спектру коливань.

Провідні властивості анізотропного гірського масиву в різних напрямках відрізняються не тільки загасанням масової швидкості коливань, але і швидкістю поширення і довжиною сейсмічної хвилі.

Використовуючи взаємозв'язок швидкості поширення хвиль з частотою коливань  $f$ , визначаємо по напрямках уздовж тріщин ( $\varphi = 0^\circ$ ) під кутом ( $\varphi = 45^\circ$ ) і перпендикулярно тріщинам ( $\varphi = 90^\circ$ ) довжину хвилі ( $m$ ) в діапазонах частот, які несуть максимальне навантаження.

Розрахунки для різних кар'єрів показали що, у межах того самого типу гірських порід, що складають масив, значення швидкості поширення сейсмічних хвиль і частота коливань змінюються залежно від дифракційного кута. У гранітах УКЩ значення швидкостей поширення сейсмічних хвиль по напрямках уздовж тріщин і перпендикулярно їм відрізняються в 2–3,8 рази, а для вапняків Прикарпатського прогину - в 1,1–1,3 рази.

Збільшення швидкості поширення сейсмічних хвиль у напрямку уздовж тріщин і значне зменшення її перпендикулярно тріщинам ще раз переконливо підтверджує розходження провідних властивостей середовища.

Екрануюча дія тріщини стосовно сейсмічної хвилі приводить до того, що швидкість поширення хвилі значно зменшується. Це є причиною того, що величини швидкості коливань у зазначеному напрямку приймають мінімальні значення, а тому вісь еліпса ізосейсм збігається з головним напрямком анізотропії тріщинуватості.

Оскільки параметри пружної хвилі змінюються зі збільшенням відстані від вибуху за рахунок не однакових поглинаючих властивостей середовища по різних напрямках анізотропного масиву, то форма контуру ізосейсм, обумовлена коефіцієнтом сейсмічної анізотропії ( $k_{sa} > 1$ ), який залежить від величини співвідношення довжини хвилі  $\lambda$  до ширини одиночної тріщини  $d$  в системі тріщинуватого масиву (рис.6.1).

Як видно з рис.6.2, функціональна залежність  $k_{sa} = f(\lambda/d)$  має криволінійну

форму і зі збільшенням співвідношення  $\lambda/d$  значення  $k_{sa}$  зменшується.

$k_{sa}$

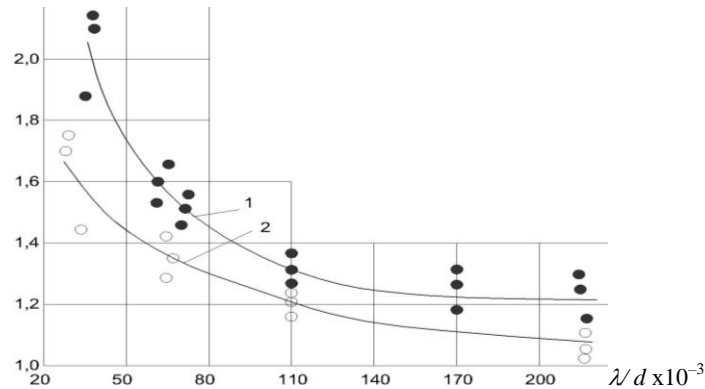


Рис. 6.2 Залежність коефіцієнта анізотропії від співвідношення  $\lambda/d$ ;  $\lambda$  – довжина хвилі;  $d$  – середнє значення ширини тріщини в системі тріщин, 1, 2 – напрямок вимірювань відповідно по нормалі і під кутом  $45^\circ$  до напрямку поширення тріщин

У середньому  $k_{sa}$  змінюється для даного випадку в діапазоні 1,8–1,1. Однак у напрямку, перпендикулярному до тріщин ( $\varphi = 90^\circ$ ), порівняно з напрямком під кутом  $\varphi = 45^\circ$  значення  $k_{sa}$  більше в 1,3 рази (при  $\lambda/d = 250–1100$ ). При  $\lambda/d$  в межах 1100–2200 значення  $k_{sa}$  зменшується. При більших значеннях  $\lambda/d$  воно наближається до одиниці, отже, еліптична форма ізосейсм переходить у круглу.

Таким чином, аналіз експериментальних даних свідчить про те, що однією з основних причин зміни форми ізосейсм є неоднаковий частотний склад коливань в різних напрямках, а також різна швидкість поширення сейсмічних хвиль. Ці результати добре сумісні з теоретичними дослідженнями, згідно з якими безрозмірний параметр при  $d = \lambda$  є критичним, при якому відбувається перехід форми ізосейсм із еліптичної в круглу тільки при зменшенні частоти.

Вивчення енергетичних навантажень, формованого від вибуху хвильового пакета, проводилося з використанням апаратури і методики, наведених у розділі 2.

Крива, яка з'єднує рівні енергії коливань по кожному з напрямків установки датчиків, дозволяє описати форму розподілу ізоенергій сейсмічних хвиль у плані анізотропного гірського масиву.

Як бачимо з рис. 5.6 (лекція 5), ізолінії енергії коливань по всіх трьох типах хвиль мають форму овалу. Порівняння його з формою ізоліній рівних масових швидкостей коливань дозволяє встановити їхній збіг у поверхневій хвилі в діапазоні низьких частот. Тому поверхневі хвилі для охоронних будинків і споруд з низькими власними частотами, є найнебезпечнішими, а отримана орієнтація цих форм стосовно тріщинуватості є надійною основою для

прогнозування сейсмобезпечних зон.

Таким чином, установлений на підставі наведених досліджень у напівпромислових умовах взаємозв'язок сейсмічної анізотропії з анізотропією гірського масиву дозволяє поглибити знання у вивченні фізико-технічних основ характеру розподілу ізосейсм і в подальшому використовувати їх у промислових умовах.

*Контрольні питання*

- 1. Поясніть, як ви розумієте поняття спектрального аналізу сейсмічних коливань*
- 2. Як залежить частотний спектр хвиль від напрямку вимірювань?*
- 3. З чим пов'язана різна провідність кожного типу сейсмічних хвиль?*
- 4. Що таке поглинаюча дія середовища?*
- 5. У якому напрямку відносно системи основних тріщин провідність найвища?*
- 6. Як відрізняються швидкості хвиль в залежності від напрямку спостереження?*
- 7. Від яких параметрів залежить коефіцієнт сейсмічної анізотропії?*
- 8. В яких умовах еліптична ізосейсма стає круглою?*
- 9. Назвіть основну причину небезпеки поверхневої хвилі*

## Лекція 7

### Трансформація амплітудно-частотного спектра масових вибухів в умовах геолого-тектонічних структур

При вивченні взаємодії об'єкта з різними типами сейсмічних хвиль необхідно знати критерії безпеки для об'єктів з різними конструктивними і функціональними особливостями.

В умовах кар'єру джерело сейсмічного випромінювання при масових вибухах розташоване в скельному масиві, над яким в більшості випадків залягає осадовий шар. Сейсмічна хвиля при переході із скельного масиву в цей шар, відбиваючись і переломлюючись на його межах, може кілька разів пробігати в ньому. В цьому випадку наступні відбиті і заломлені хвилі накладаються на попередні. Це може привести до резонансних явищ. Такий інтерференційний ефект залежить від поєднання товщини шару наносів ( $h$ ) і довжини хвилі ( $\lambda$ ). Очевидно, що даний рух не може бути описаний аналітично.

При переході з скельного масиву в наноси навіть при відсутності ефекту інтерференції параметри сейсмічної хвилі змінюються за рахунок заломлення на межі. Після її виходу на земну поверхню зароджується поверхнева сейсмічна хвиля Релея ( $R$ ) з іншими законами загасання і параметрами руху, ніж в об'ємних хвилях ( $P$  і  $S$ ). Взаємодія цієї хвилі з фундаментами будівель (об'єктами з періодом власних коливань до 5–7с) викликає в них напруження і деформації, що визначають ступінь сейсмічної безпеки масових вибухів.

Не дивлячись на те, що в реальних умовах ведення вибухових робіт в навколишнє середовище випромінюється велика кількість хвиль різних типів, зазвичай дослідники обмежуються розглядом 3-х основних. Це об'ємні хвилі ( $P$  і  $S$ ) у масиві і поверхневі ( $R$ ), що розповсюджуються вздовж вільної поверхні.

Виходячи з цього, для зниження сейсмічного ефекту при незмінній загальній масі заряду потрібно застосувати таку технологію висадження, за якої максимальне значення амплітуд сейсмічного процесу буде формуватись в поперечній чи у повздовжній хвилях. Цього можна досягти шляхом зміни інтервалів сповільнення, маси зарядів та їх кількості в групах.

На прикладі осцилограми (рис.7.1) розглянемо розподіл коливального процесу на фази за типами хвиль. Поверхневу фазу відображає відрізок з найбільшим періодом коливань ( $Vr$ ). Поперечна фаза має так звані "зазубринки" ( $Vs$ ), а повздовжній фазі відповідає відрізок з великою частотою ( $Vp$ ). Найбезпечнішою фазою для об'єктів з низькочастотним спектром власних коливань буде та, максимальні значення амплітуди якої будуть **припадати на ділянки з максимальною частотою.**

Навпаки, у разі отримання максимальних значень амплітуд коливань на відрізку з максимальним періодом, внаслідок відповідності коливань в сейсмічній хвилі власним коливанням будівель процес викликатиме найбільшу небезпеку.

Об'ємні хвилі характеризуються порівняно високими частотами (10–40 Гц), поверхнева хвиля характеризується слабким загасанням з відстанню, великими амплітудами і низькими (2–8 Гц) частотами.

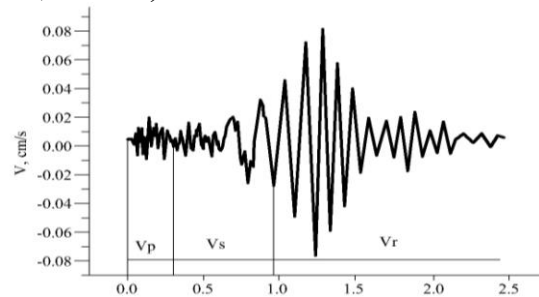


Рис. 7.1 Характерні осцилограми з розподілом коливального процесу на відрізки, які відповідають різним типам хвиль

Для будівель масової забудови навколо діючих кар'єрів найбільшу небезпеку являють поверхневі типи хвиль. Вони за частотним спектром і за максимальним значенням амплітуд коливань найбільш наближені до параметрів власних коливань цих об'єктів. Тому об'єктом дослідження приймаються поверхневі хвилі Релея.

При короткочасних вибухах зарядів ВР у різних геолого-тектонічних моделях анізотропного гірського масиву сейсмічні коливання спотворюються та утворюють досить складну хвильову картину. Розходження в періодах об'ємних і поверхневих хвиль відбувається як за рахунок неоднорідності порід, так і через набігання хвиль від суміжних зарядів, що підриваються короткочасно. Зіставити такі досить важливі характеристики вибуху як спектральний склад, енергія різних частот, форма спектру і інше можливо тільки оперуючи спектральною щільністю сейсмоколивань.

Графічне зображення сейсмоколивань у вигляді спектрів дозволяє аналізувати сейсмічні прояви короткочасного вибуху, коли швидкість коливань описується більш складною формою порівняно із загасаючою синусоїдою. При цьому допускається, що кінцеве або нескінченне число складових коливань поширюється в анізотропному середовищі незалежно одна від одної.

На рис. 7.2, 7.3 зображено спектри коливань, отримані для ідентичних схем короткочасного висадження зарядів, але в різних гірських породах. Для масивів порід, де анізотропія проявляється у вигляді закономірно орієнтованої тріщинуватості, в спектрі коливань завжди спостерігається тільки один максимум. В масивах порід із блоковою будовою спостерігаються два максимуми: в діапазоні низьких і високих частот.

Така особливість у формуванні спектральних характеристик пояснюється тим, що:

а) наявність у масивах порід системи паралельних тріщин для поверхневих хвиль не є джерелом додаткового відбиття коливань. Тому хвиля безперешкодно



поширюється по середовищу, тільки з відстанню втрачає величину своєї амплітуди;

б) у масивах блокової будови (геолого-тектонічна структура 1-го класу підкласу Б) в спектрі коливань спостерігається два максимальних значення щільності. З рис. 7.3 видно, що максимальні амплітуди коливань ґрунту відносяться, як до об'ємних високочастотних (40–100 Гц), так і до поверхневих низькочастотних (10–15 Гц) хвиль. Швидкість зміщення часток ґрунту для об'ємних і поверхневих хвиль майже однакова. Отже, амплітудно-частотні характеристики хвильового процесу є несприятливі для об'єктів як з низькими, так і з високими гармоніками власних коливань.

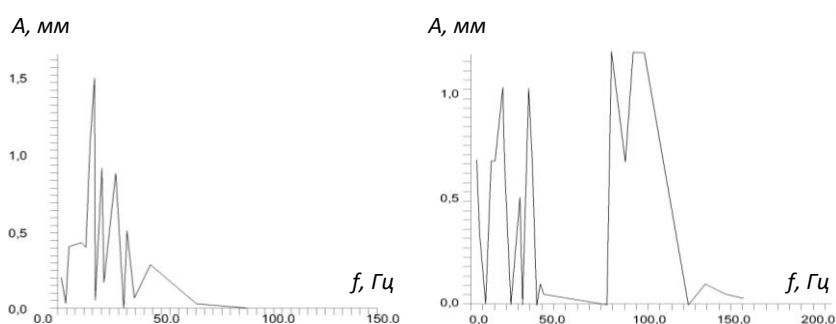


Рис. 7.2 Спектр коливань у масивах порід з системою паралельних тріщин. Кар'єри I класу – підклас А (маса заряду 7200 кг, відстань 150 м)  
 Рис.7.3 Спектр коливань у масиві з системою паралельних тріщин і міжблокових порушень. Кар'єри I-го класу – підклас Б (маса заряду 7200 кг, відстань 250 м)

Отже, вплив технологічних факторів на сейсмобезпеку об'єктів, розташованих в різних геолого-тектонічних структурах території України, можливо прогнозувати шляхом вивчення спектральної щільності відносно кожного типу сейсмічних хвиль. Таким фактором може бути інтервал сповільнення в схемі висадження зарядів. Якщо інтервал сповільнення здійснюють штатними засобами, наприклад, за допомогою піротехнічних засобів реле КЗДШ-69 з інтервалом 10; 20; 35; 50; 75; 100 мс, то можливо одержати результуючі коливання на різних відстанях і по різних азимутальних напрямках від епіцентру вибуху, у спектрі яких будуть спостерігатися як мінімальні, так і максимальні значення в різних діапазонах частот.

На рис. 7.4 зображено спектрограми короткочасного вибуху зарядів з інтервалом уповільнення 20; 35; 50 мс в масиві порід з тріщинуватістю і блоковою будовою.

З наведених спектрів видно, що в міру збільшення інтервалу сповільнення спектр змінюється. При збільшенні інтервалу сповільнення максимальне значення спектральної щільності зменшується. Зниження сейсмічної небезпеки обумовлено відсутністю накладення коливань після кожного наступного заряду, що

підривається, у схемі КСВ і створення монотонного зменшення спектральної щільності на частоті головного максимуму.

Для блокової будови, коли вибух відбувається на одному блоці, а охоронювані об'єкти розташовані на іншому блоці, розділеному тектонічними порушеннями, зниження сейсмічної небезпеки забезпечується інтервалом уповільнення, що зменшує як спектральну щільність головного максимуму, так і енергонасиченість частот резонансного діапазону.

У цьому зв'язку для забезпечення сейсмобезпеки завжди доцільно збільшити інтервал уповільнення до величини, рівної тривалості **коливання від одного свердловинного заряду**.

Однак значення інтервалу сповільнення обмежується чинником механічного підбивання сусідніх зарядів, а також тим, що при більших інтервалах сповільнення значна частина енергії сейсмічного випромінювання від сусідніх зарядів встигає розсіятись.

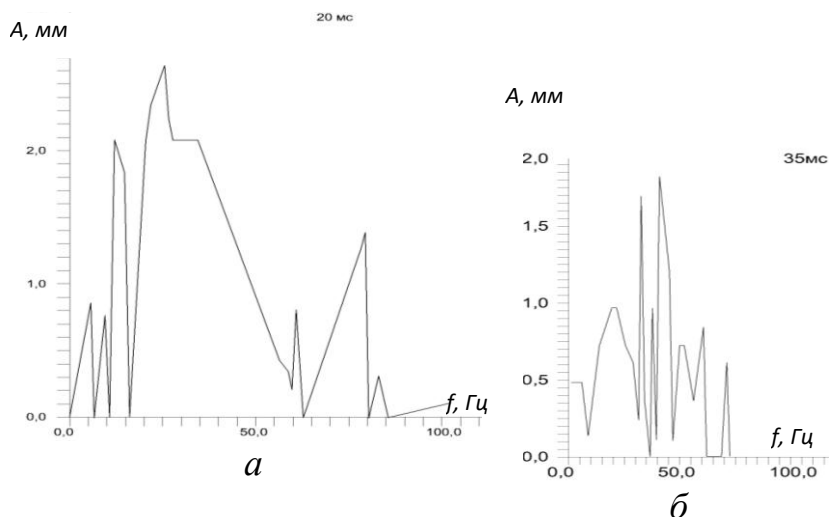


Рис.7.4 Характерні спектрограми короткосповільненого вибуху зарядів ВР з інтервалами сповільнення:  $a$  – 20 мс;  $b$  – 35 мс відповідно

#### Контрольні питання

1. Опишіть реальну картину проходження хвиль в шаруватому середовищі
2. Від чого виникають явища інтерференції хвиль?
3. Наведіть частотні характеристики різних типів сейсмічних хвиль.
4. Поясніть особливості поширення хвиль при короткосповільненому підриванні.

5. Поясніть, чи залежать між собою складові коливань
6. Як впливає період сповільнення на спектральний склад коливального процесу?
7. Поясніть особливості спектра коливань в блокових структурах
8. Чому не можна довільно збільшувати інтервал сповільнення?

## Лекція 8 Сейсмостійкість бортів кар'єру за критерієм прискорення

Для розрахунку стійкості укосів та бортів кар'єру за критерієм прискорення скористаємось методом круглоциліндричної поверхні ковзання. Враховуючи те, що даний метод розроблений для однорідних порід, спочатку проведемо розрахунки в межах уступів з однорідними породами. В подальшому будемо враховувати всі типи порід, що складають борт кар'єру.

При розрахунках стійкості уступу кар'єру чи вектора сили, призма ковзання ділиться вертикальними лініями на ряд елементів. Звичайно ці елементи приймаються такими, щоб без втрати точності можна було в їх межах приймати поверхню **за площину**, а контур укосу, дію зовнішніх сил тощо практично однорідними (рис. 8.1).

Розглянемо умови рівноваги  $i$ -того елемента. Усі зовнішні активні сили (маса ґрунту у відсіку, зовнішнє навантаження і т.д.), що діють на  $i$ -тий елемент, приводяться до рівнодіючої  $P_i$ .

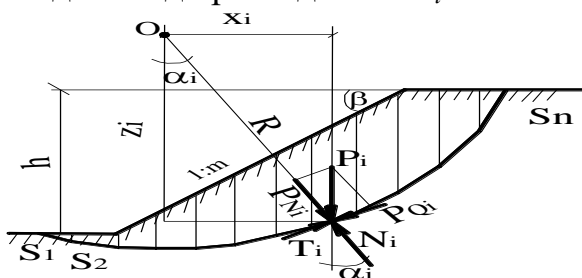


Рис. 8.1 Схема рівнодіючих сил на  $i$ -тий відсік уступу борту кар'єру

Останню розкладаємо у точці її прикладення на складові: нормальну  $P_{Ni}$  і дотичну  $P_{Qi}$  до площини переміщення елемента:

$$\begin{aligned} P_{Ni} &= P_i \cos \alpha_i, \\ P_{Qi} &= P_i \sin \alpha_i. \end{aligned} \quad (8.1)$$

Припускаємо, що центр  $O$  і радіус кривизни  $R$  поверхні ковзання нам відомі. У цьому методі сили взаємодії між сусідніми елементами не враховуються, спираючись на те, що сума цих сил повинна дорівнювати нулю, а сумарний момент від них відносно точки  $O$  невеликий. Дотична сила від усіх навантажень  $P_{Qi} = P_i \sin \alpha_i$  є рушійною силою, яка може викликати зсуви в уступах кар'єру.

Сила опору переміщення сипучого тіла, яка знаходиться за поверхнею ковзання (реакція), може бути представлена у вигляді суми сил тертя і зчеплення:

$$T_i = N_i \tan \varphi_i + c_i s_i, \quad (8.2)$$

де  $N_i$  – нормальна реакція опори;

$s_i$  – довжина дуги поверхні ковзання;

$\varphi_i$  – кут внутрішнього тертя в межах дуги  $s_i$ ;

$c_i$  – питоме зчеплення в межах дуги  $s_i$ .

Із рівняння проекції усіх сил на нормаль до площадки елемента отримаємо:

$$N_i = P_{Ni} = P_i \cos \alpha_i \quad (8.3)$$

Друге рівняння проекції залишається незадовільним, оскільки сили взаємодії між елементами не розглядаються. Умова рівноваги укосів зводиться до рівняння моментів усіх сил, що діють на сповзаючу призму відносно центру  $O$  поверхні ковзання [7, 19].

Але такий підхід не враховує змін характеристик порід за міцністю (сил зчеплення), які відбуваються при динамічному (імпульсному) режимі навантаження.

Врахування сейсмічної дії при розрахунку протизсувних утримуючих конструкцій реалізується додаванням до розрахункових зусиль так званої інерційної сейсмічної сили  $S_{ci}$  [8].

Сейсмічна сила  $S_{ci}$  наближено визначається як частка від маси ґрунту, яка піддається сейсмічному впливові, і має вигляд:

$$S_{ci} = \frac{a_c}{g} P_i, \quad (8.4)$$

де  $a_c$  – сейсмічне прискорення;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Маючи на увазі, що коефіцієнт динамічної сейсмічності  $\mu = a_c/g$ , отримаємо:

$$S_{ci} = \pm \mu P_i. \quad (8.5)$$

Напрямок сили  $S_{ci}$  є найбільш несприятливим. У зв'язку з цим приймаємо, що сейсмічні сили у кожному елементі зсувного блоку направлені вздовж основи елемента. Умова рівноваги укосів зводиться до рівняння моментів усіх сил, які діють на сповзаючу призму, відносно центру  $O$  поверхні ковзання.

$$\sum P_i x_i + R \sum S_{ci} - \frac{R}{k} \sum T_i = 0, \quad (8.6)$$

де  $R$  – радіус, що описує поверхню призми обвалення.

При цьому сили опору переміщення зменшуються у  $K$  разів з врахуванням необхідності забезпечити певний запас стійкості відкосу проти руйнування:

$$K_c = \frac{R \sum T_i}{\sum P_i x_i + R \sum S_{ci}}.$$

Тоді коефіцієнт  $K_c$  :

$$K_c = \frac{R \sum P_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + R \sum c_i s_i}{\sum P_i x_i + R \sum S_{ci}}. \quad (8.7)$$

Враховуючи, що  $\cos \alpha_i = x_i/R$ , та те, що сейсмічні хвилі від масових вибухів діють на систему укосів, складену різними породами, остаточно отримаємо значення коефіцієнту запасу стійкості:

$$K_c = \frac{\sum_1^j P_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + \sum_1^j c_i s_i}{\sum_1^j P_i \cos \alpha_i + \sum_1^j S_{ci}}. \quad (8.8)$$

Значення коефіцієнту динамічної сейсмічності  $\mu$  для розрахунку природних схилів рекомендують приймати за табл. 8.1. При розрахунку штучних укосів (насипи доріг, греблі т.д.) значення коефіцієнту з табл. 8.1 слід збільшувати приблизно у 1,5 рази.

Таблиця 8.1

### Коефіцієнт динамічної сейсмічності

Сейсмічна бальність району	6	7	8	9	10	11	12
$\mu$	0,00	0,025	0,05	0,1	0,25	0,50	>0,75

Для розрахунку коефіцієнту динамічної сейсмічності  $\mu$  для уступів та бортів кар'єру більш правильно буде виразити його, використовуючи рівняння методу круглоциліндричної поверхні ковзання. Для цього розкладемо інерційну сейсмічну силу на рис. 8.2 на вертикальні і горизонтальні складові відповідно.

$$S_{C.B.i} = \pm S_{c.i} \sin \xi;$$

$$S_{C.F.i} = \pm S_{c.i} \cos \xi,$$

де  $\xi$  – кут виходу сейсмічного імпульсу до горизонту.

Вплив вертикальної та горизонтальної складових сейсмічного прискорення на ступінь стійкості різний. Складова  $S_{C.B.i}$  у певні моменти коливання здатна розвантажити масу призми обвалення. Складова  $S_{C.F.i}$  може збільшувати зсувні сили. Зазвичай  $S_{C.B.i}$  і  $S_{C.F.i}$  приймають як такі, що діють у напрямку зниження ступеню стійкості уступу та борту кар'єру.

Визначимо плечі сил  $S_{C.B.i}$  і  $S_{C.F.i}$  відносно центру обертання призми обвалення відповідно  $n$  і  $m$ . Використовуючи метод круглоциліндричної поверхні ковзання, можна записати:

$$\mu = \frac{\sum_1^j (P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + c_i l_i) R}{\sum_1^j (P_i \sin \alpha_i) R + S_{C.F.} m + S_{C.B.} n} \quad (8.9)$$

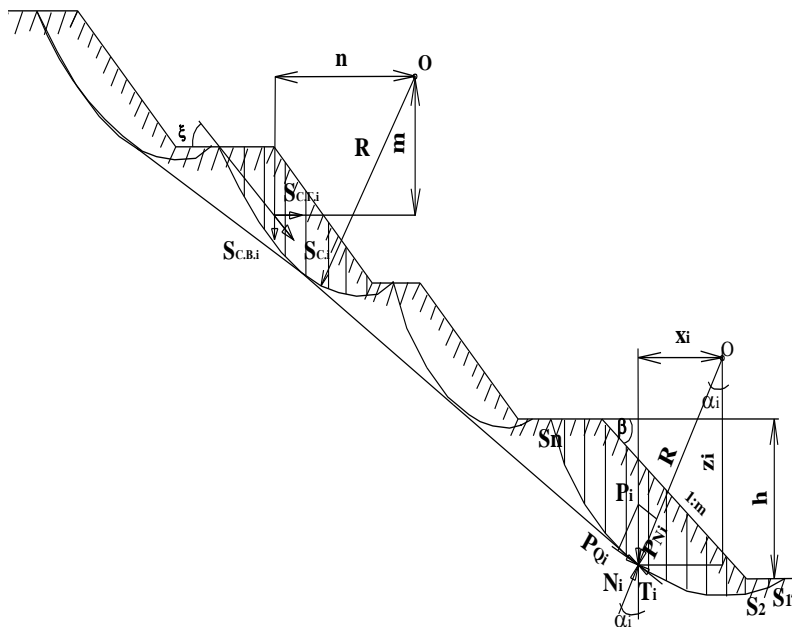


Рис. 8.2 Схема дії сейсмічної сили на окремі уступи та борт кар'єру в цілому

Вплив сил інерції на зміну стійкості уступу (борту) [9] може бути представлено як збільшення його крутизни на кут:

$$\delta_c = \arctg \mu . \quad (8.10)$$

З формули (8.10) випливає, що при прискоренні  $a$  земна поверхня зазнає нахилу на кут  $\delta_c$ , а ступінь стійкості укосу знижується [10]. Прискорення може бути знайдено через інтенсивність сейсмічних коливань (табл. 8.2).

Одиниця прискорення, як показують дослідження [7,8,11-13], є ефективним критерієм стійкості укосів при веденні вибухових робіт у кар'єрі.

У табл.8.3 представлена допустима величина одиниці прискорення для гірничих об'єктів, складених неоднорідними гірськими породами

Таблиця 8.2

Сейсмічне прискорення

$\Delta B$ , бали	6	7	8	9
$a$ , мм/с <sup>2</sup>	300–600	610–1200	1200–2400	2410–4800

Таблиця 8.3

Значення допустимих одиниць прискорення для укосів

Гірничі породи	Допустиме значення одиниці прискорення, $g$
М'які породи, наноси	0,15
Скельні породи:	
– сильно тріщинуваті з глиною і високою пористістю	0,50
– сильно тріщинуваті	0,90
– середньо тріщинуваті	1,30
– слабо тріщинуваті	1,90
– дуже міцні і монолітні, практично без тріщин	2,25

Наведені аналітичні розрахунки можуть бути використані для оцінки стійкості бортів кар'єру за критерієм прискорення після отримання експериментальних даних з осцилограм в реальних умовах взаємодії СВХ з уступами.

*Контрольні питання*

1. Поясніть принцип побудови схеми розрахунку стійкості укосу методом кругло циліндричної поверхні
2. Сформулюйте умову рівноваги елементарного об'єму укосу.
3. Які сили опираються переміщення?
4. Поясніть сутність сейсмічної сили?
5. Яка сила додається при імпульсному навантаженні?
6. Що таке коефіцієнт динамічної сейсмічності?
7. На які сили розкладається інерційна складова?
8. Як впливає сейсміка на стійкість укосу?





## Лекція 9

### Сейсмостійкість бортів кар'єру за критерієм масової швидкості коливань

Для розрахунку сейсмічної стійкості багатошарового борту кар'єру в умовах масового вибуху потрібне правильне визначення шляху поширення сейсмічної хвилі і ступеня її поглинання гірськими породами.

В літературі є подібні роботи, пов'язані із землетрусами. Відправною точкою досліджень поширення сейсмічної вибухової хвилі (СВХ) зручніше за все взяти зовнішню межу сейсмічного осередку вибуху (СОВ). На ній масова швидкість у хвилі є величиною постійною для певного типу ґрунту незалежно від маси заряду.

Межу СОВ на сейсмограмах можна визначити за характерними ознаками коливань. На графіках ця межа визначається в точці, де змінюється ступінь загасання амплітуд і періодів коливань у хвильовому процесі в залежності від відстані, де змінюється залежність інтенсивності коливань у хвилі від глибини закладення заряду.

Дослідження в області інженерної сейсмології показують, що СОВ ототожнюється із зоною необоротних деформацій ґрунту, а зовнішня межа її розділяє зони непружних і пружних коливань ґрунту.

Відстань до цієї межі від заряду  $ВР$  називається радіусом сейсмовипромінювання. Таким чином, межа між СОВ і пружною зоною коливань ґрунту є зоною зародження хвилі пружних коливань, а її відстань до заряду  $ВР$  – радіус сейсмовипромінювання  $R$ . Результатами досліджень, у тому числі [7,14] встановлено, що СОВ пропорційний масі заряду, що підривається:

$$R_0 = K_0 Q^{1/3} = 5,5 \cdot 3945^{1/3} = 85, \text{ м} \quad (9.1)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт пропорційності, який на основі аналізу опублікованих даних змінюється залежно від типу порід. Для масових ґрунтів  $K_0 = 2,5 \text{ м/кг}^{1/3}$ , для порід вугільних родовищ  $K_0 = 4 \text{ м/кг}^{1/3}$ , для більшості скельних непорушених порід  $K_0 = 5,0\text{--}5,5 \text{ м/кг}^{1/3}$ , для глин  $K_0 = 7,5\text{--}8,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ , для суглинків  $K_0 = 8,0\text{--}9,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ ;  $Q$  – маса заряду, що підривається миттєво, кг. За даними японських учених  $R_0 = 5,8Q^{0,38}$ .

Поставлене завдання виконувалось вимірюванням інтенсивності коливань ґрунту (масової швидкості) в багатошаровому середовищі в умовах масових вибухів на залізорудному кар'єрі ВАТ "Полтавський ГЗК". При кожному масовому вибуху підривалось декілька рудних блоків з інтервалом біля  $1\div 5$  с. Блоки були розосереджені по території кар'єру, що дозволяло при одному підриванні реєструвати декілька акустичних хвиль від кожного блоку. Блок розбурювався сіткою свердловин діаметром 250 мм і довжиною 11–20 м з кроком близько 6м. Одночасно підривалась група із  $4\div 8$  свердловин. Наступна група підривалась з затримкою 50–300 мс. Кількість груп у блоці від 20 до 100.

Маса вибухової речовини (анемікс) у групі – 4 тонни. Така технологія вибухового руйнування дозволяє зменшити сейсмічний вплив масових вибухів.

Аналіз поширення поперечної хвилі  $S$ , як найбільш інтенсивної, від точки  $O$  (межа СОВ) до точки  $B_4$  (вільна поверхня) проводився за схемою на рис. 9.1 .

Алгоритм розрахунку сейсмобезпечних параметрів масового вибуху на прикладі поширення поперечної хвилі  $S$  від точки  $O$  до точки  $B_4$  буде показано далі. Маса вибухової речовини 3945 кг.

Швидкість зміщення частинок ґрунту у точці  $O$ :

$$U_0 = \sqrt{\frac{V_p}{\gamma} \left(1 - \frac{4 V_S^2}{3 V_p^2}\right)^2} K_0^{-2} = 12,5 \text{ см/с}, \quad (9.2)$$

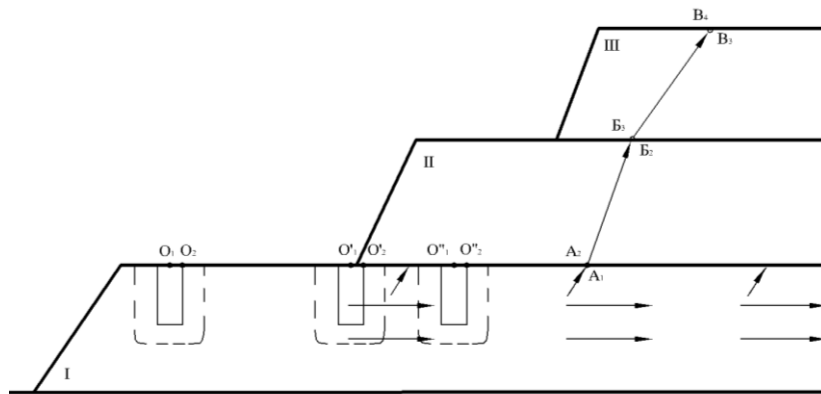


Рис.9.1. Схема для рішення прямої задачі розповсюдження сейсмічної хвилі від місця вибуху до вільної поверхні: I – підстилюючий шар скельних порід (акустична жорсткість  $N_1 = 2,01 \times 10^7 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ), II – шар скельних порід ( $N_2 = 1,51 \cdot 10^7 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ), III – шар м'яких порід ( $N_3 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ),  $O_1, O'_1, O''_1$  – місця закладення зарядів ВР ;  $O_2, O'_2, O''_2$  – межі зони СОВ

При переломленні хвилі в шар II

коефіцієнт переломлення буде рівним  $k$

а швидкість коливання ґрунту в точці  $A_2$ :

$$U_1^{A_2} = U_1 K_1 = 0,375 \text{ , см/с},$$

В точці  $B_2$ :

$$U_2 = U_1^{A_2} \exp[-\alpha_2(f)r_2] = 0,184 \text{ см/с, поглинання}$$

енергії хвилі в шарі II

$$\alpha_2(f) = 4,34 \cdot 10^{-3} - r_2 - \text{товщина шару II } (r_2 = 150 \text{ м}).$$

При переломленні хвилі в шар III коефіцієнт переломлення  $K_2$ , становить 1,79, а швидкість коливання ґрунту в точці  $B_3$  – 0,329 см/с.

У м'якому шарі III СВХ буде поширюватися відповідно залежності

$$U_3 = U_2^{B_3} \exp[-\alpha_3(f)r_3] = 0,21 \text{ см/с},$$

де  $\alpha_3(f) = 0,465$  – поглинання енергії хвилі у м'якому шарі;  $r_3$  – товщина шару III ( $r_3 = 50$  м).

Як відомо, при відбитті хвилі від вільної поверхні амплітуда її подвоюється, тому в точці  $B_4$ , на вільній поверхні шару м'яких порід, швидкість коливань ґрунту буде 0,42 см/с.

Таким чином визначено інтенсивність коливання на вільній поверхні багат шарового масиву гірських порід [14].

Аналогічним чином можливо розв'язати і обернену задачу. При розв'язанні оберненої задачі можливе визначення практичних питань. Наприклад, можна встановити стійкість уступу кар'єру. Продемонструємо рішення даного питання на наступному прикладі. Необхідно визначити сейсмобезпечну масу заряду при масовому вибуху в кар'єрі для забезпечення сейсмостійкості уступу кар'єру, складеного наносними м'якими породами (шар III на рис.9.1).

Для рішення цього завдання використаємо ті ж розрахункові дані, що і при прямій задачі.

Згідно нормативних даних уступ кар'єру, складений наносними породами і строком експлуатації більше 5–10 років, відноситься до другого класу споруд, а допустима швидкість переміщення його становить 8,2 см/с.

Приймаємо в точці  $B_3$  швидкість переміщення ґрунту  $U_3 = 8,2$  см/с, а в точці  $B_2$  у шарі II скельних порід швидкість переміщення частинок ґрунту буде:

$$U'_2 = U'_3 \frac{2N_3}{N_3 + N_2} = 1,75 \text{ см/с.} \quad (9.4)$$

У точці  $A_2$  шару II швидкість переміщення ґрунту (см/с) буде дорівнювати:

$$U''_2 = U'_2 \exp[\alpha_2(f)r_2] \quad (9.5)$$

У точці  $A_1$  підстиляючого шару скельних порід I швидкість переміщення ґрунту становить:

$$U'_1 = U''_2 \frac{2N_2}{N_2 + N_1} = 2,92 \text{ см/с.} \quad (9.6)$$

Знаючи значення швидкості коливання в точці  $A_1$  і на границі СОВ (маса заряду ВР  $Q_1$  залишається незмінною), визначаємо відстань  $r_1'$  між точкою  $A_1$  і новою границею СОВ (точка  $O_2'$ ), вирішуючи залежність:

$$U_0 = U'_1 \exp[\alpha_1(f)r_1'], \text{ звідки } r_1' = 365, \text{ м.} \quad (9.7)$$

Таким чином, при збереженні незмінної маси зарядів у групі можна знайти мінімальну сейсмобезпечну епіцентральну відстань на заданому горизонті (між

точками  $A_1$  і  $O_1'$ ), при якій зберігається стійкість уступу м'яких порід  $365 + 85 = 450$  м.

Для обчислення інших сейсмобезпечних відстаней (м) або мас зарядів (кг) при веденні ВР можна скористатися методом динамічної подібності (для даних умов коефіцієнт  $K = 450$ ) і обчислити параметр, що цікавить, за однією із формул:

$$Q_{дон} = \left( \frac{U_{дон}}{K} \right)^{\frac{3}{n}} r^3 \text{ або } r_c = \left( \frac{K}{U_{дон}} \right)^{\frac{2}{3}} Q^{\frac{1}{3}}, \quad (9.8)$$

де  $U_{дон}$  – швидкість переміщення часток ґрунту в точці  $A_1$ ;

$n$  – показник степеня загасання ( $n = 1,5$ ).

Необхідно врахувати важливу обставину, пов'язану зі зміною технології ВР при масових вибухах у зв'язку із застосуванням у наш час ініціюючих засобів типу Nonel. Ці засоби забезпечують можливість одночасного висадження маси заряду тільки однієї свердловини, або його частини звнутрішньо свердловинним сповільненням.

#### *Контрольні питання*

- 1. З якої межі починається вибухове сейсмовипромінювання?*
- 2. За якими ознаками визначається межа виникнення зони сейсмічних коливань?*
- 3. З чим ототожнюється радіус зони сейсмічних коливань?*
- 4. Через який параметр визначається радіус СОВ?*
- 5. Опишіть алгоритм переходу пружної хвилі через шаруватий масив.*
- 6. Опишіть алгоритм оберненої задачі.*
- 7. Вкажіть на переваги короткосповільненого підривання.*
- 8. Які переваги системи Nonel при реалізації протисейсмічних заходів?*

## Лекція 10

### Оцінювання типу пружних хвиль за припустимою деформацією бортів кар'єрів

Вирішення різних гірничотехнічних завдань пов'язано з дослідженнями деформованості гірських порід в масиві, а також з визначенням і використанням їх деформаційних характеристик.

Допустима швидкість зміщення частинок ґрунту  $U_{\text{доп}}$ , при якій уступ залишиться стійким, зв'язана з допустимим значенням відносної деформації  $D$  співвідношеннями:

$$D = \frac{U_{\text{доп}}}{V_S}; U_{\text{доп}} = DV_S, \quad (10.1)$$

де  $V_S$  – швидкість поперечної об'ємної хвилі.

Розглянемо швидкість переміщення частинок ґрунту для точки  $A_2$ , що знаходиться на підшві розкривного уступу (рис. 10.1), складеного пісками і глинами.

$$U'_{A_2} = 0,0005 \cdot 660 = 0,33, \text{ м/с.} \quad (10.2)$$

Мінімальні відстані від останнього ряду свердловин до підніжжя уступу, складеного суглинками, при якій збережеться його стійкий стан, наведені в табл. 10.1.

Швидкість розповсюдження поперечної хвилі знайдемо з табл.10.2 .

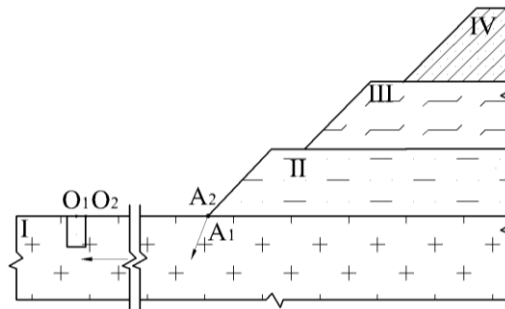


Рис. 10.1. Схема до розрахунку оберненої задачі в породах ВАТ "Полтавський ГЗК"

Таблиця 10.1

Мінімальна відстань від останнього ряду свердловин до підніжжя уступу суглинку за умови збереження його стійкості

Клас	II	III	IV
Термін служби укусу	5–10 р.	до 5 р.	тимчасовий
Допустима відносна деформація	0,0002	0,0003	0,0005

Мінімальна відстань при $V_s$ , м	406	310	193
Мінімальна відстань при $V_p$ , м	283	193	72
Мінімальна відстань при псевдорелеївській $V_R$ хвилі, м	426	331	214

Швидкість зміщення частинок ґрунту для точки  $A_1$  становить:

$$U'_{A1} = U'_{A2} \frac{2N_2}{N_2 + N_1} = 0,33 \cdot 0,237 = 7,8 \text{ см/с.} \quad (10.3)$$

Таблиця 10.2

Швидкість хвиль

Порода	Швидкість поздовжн. хвилі, $V_p$ , м/с	Швидкість поперечн.хвилі, $V_s$ , м/с	Акустична твердість, $N$ , кг/м <sup>2</sup> ·с
Скеля	4310	2590	$1,51 \cdot 10^7$
Пісок, глина	1100	660	$2,03 \cdot 10^6$
Алевроліти, глини, піщаники, мергелі	1800	1080	$4,32 \cdot 10^6$
Піски дрібнозернисті глинисті, суглинки	1000	600	$1,8 \cdot 10^6$

Швидкість переміщення ґрунту у точці  $O_1$ :

$$U_0 = \sqrt{\frac{V_p}{\gamma} \left(1 - \frac{4 V_s^2}{3 V_p^2}\right)^2} K_0^{-2} = \sqrt{\frac{4310}{3500} \left(1 - \frac{4 \cdot 2590^2}{3 \cdot 4310^2}\right)^2} K_0^{-2} = 14,5 \text{ с} \quad (10.4)$$

м/с.

Використовуючи формулу (), знайдемо сейсдобезпечну відстань від межі СОВ до підніжжя уступу, при якій даний уступ збереже свою стійкість:

$$r' = \frac{\lg U_0 - \lg U'_{A1}}{\lg e} \cdot \alpha_1(f)^{-1} = 143 \text{ м.} \quad (10.5)$$

Радіус СОВ при загальній масі ВР 1000 кг:

$$R_0 = K_0 Q^{1/3} = 5,0 \cdot 1000^{1/3} = 50 \text{ м.} \quad (10.6)$$

Знайдемо мінімальну сейсдобезпечну епіцентральною відстань на заданому горизонті (між точками  $A_1$  і  $O_2$ ), при якій зберігається стійкість уступу розкривних порід:  $143 + 50 = 193$ м.

Значення мінімальної сейсдобезпечної відстані для розкривного уступу II, в залежності від строку служби уступу, наведено табл. 10.1.

В умовах багатоблокового підривання впливу сейсмічних хвиль незалежно від горизонту їх розташування піддаються всі об'єкти, що знаходяться у кар'єрі.

Методикою досліджень передбачалось визначення закономірностей загасання сейсмічних хвиль в напрямках зверху вниз і знизу вгору по борту кар'єру.

В експериментах спостерігається аномальний характер зміни швидкості зміщення при розповсюдженні сейсмічних хвиль відповідно вгору та вниз по уступах кар'єру. На деякій відстані по висоті кар'єру спостерігаються мінімальні швидкості зміщення, після чого вони починають підвищуватись. Це можна пояснити проходженням хвилі через породи з різною акустичною жорсткістю.

Мінімальні швидкості зміщення спостерігаються на відстані  $80 \div 100$  м від вибуху незалежно від горизонту розміщення підривного блоку. Такий характер зміни швидкості зміщення з глибиною свідчить про нерівномірність її розподілення по борту кар'єру. На певній відстані вона має тенденцію до збільшення.

У формулу для розрахунку інтенсивності коливань необхідно вводити коефіцієнт, який буде враховувати зміну швидкості зміщення за рахунок пониження горизонту розміщення підривного блоку [7]:

$$K_H = e^{-\zeta(H \pm H_1)}, \quad (10.7)$$

де  $\zeta$  – емпіричний коефіцієнт;

$H \pm H_1$  – різниця відміток горизонтів розміщення вибуху і об'єкту, м.

Це рівняння справедливе для  $H \pm H_1 \leq 100$  м і в графічному вигляді показано на рис. 10.2.

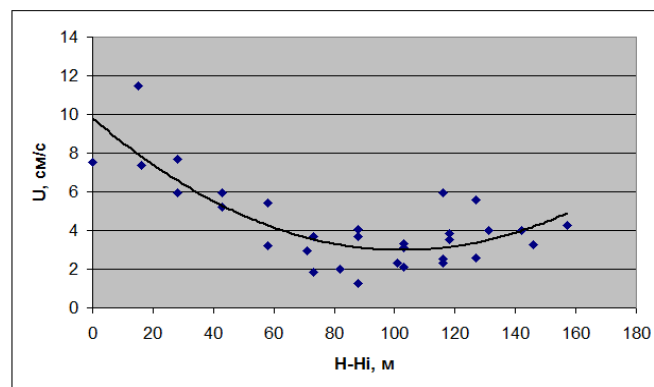


Рис. 10.2. Зміна швидкості зміщення частинок ґрунту за рахунок пониження горизонту проведення ВР

Силкові параметри поперечної хвилі від дії тривалих багатоблокових підривань можна визначити за формулами:

$$\sigma_{сж} = U_{A_2} V_R \rho, \quad \tau_{сд} = C + \sigma_{сж} \tan \varphi, \quad \tau_{расп} = \sigma_{сж} \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (10.8)$$



Залежність сейсмобезпечної відстані від деформації в укосах та від допустимої швидкості коливань частинок ґрунту, при яких ґрунтові уступи будуть залишатись стійкими під час багатоблокових масових вибухів, для різних типів об'ємних хвиль наведена відповідно на рис. 10.3, 10.4.

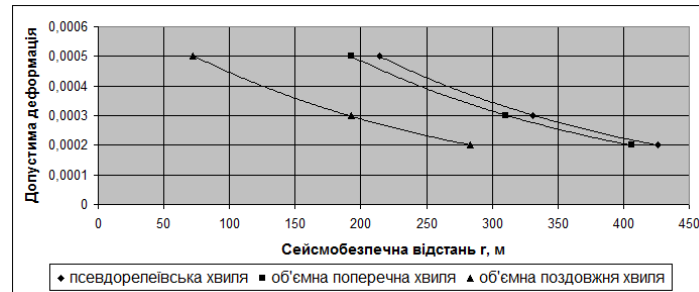


Рис. 10.3. Залежність сейсмобезпечної відстані від допустимої деформації в укосах для різних типів хвиль

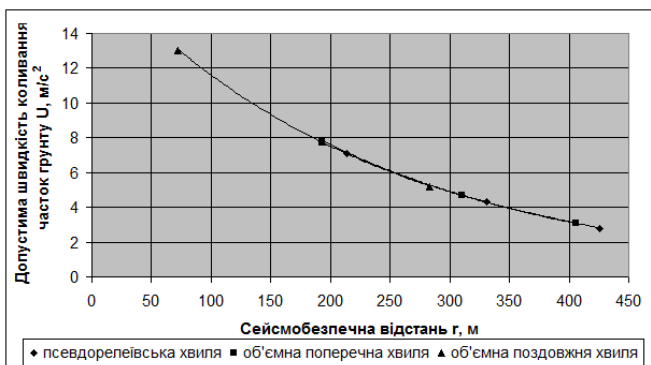


Рис. 10.4 . Залежність сейсмобезпечної відстані від допустимої швидкості коливання частинок ґрунту в укосах для різних типів хвиль

З графіків, які зображені на рис. 10.2, 10.3 видно, що найбільша сейсмобезпечна відстань є для псевдорелеївської хвилі, тобто на великих відстанях розповсюдження вона буде домінуючою. Але біля підніжжя ґрунтових уступів, у місці її зародження, псевдорелеївська хвиля все ж слабша від поперечної об'ємної. Тому на стійкість ґрунтових уступів при багато блоковому підриванні впливають поперечні хвилі, що є підтвердженням аналітичних даних.

#### Контрольні питання

1. Які параметри визначають відносну деформацію середовища в сейсмічній хвилі?
2. Як залежить акустична твердість від типу породи?
3. Оцініть тенденцію зміни мінімальної відстані між свердловинами останнього ряду та нижньою бровкою розкривного уступу
4. Що таке епіцентральної відстань?

5. *В чому полягає аномальність зміни швидкості зміщення по борту кар'єру?*
6. *Поясніть причину аномальності зміни швидкості зміщення*
7. *Як впливає тип хвилі на допустиму деформацію в укосах?*
8. *Які хвилі найбільше впливають на стійкість уступів?*



## Тема 4 СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

### Лекція 11

#### Сейсmobезпека непошкоджених будівель

Згідно з існуючими нормативами оцінка сейсмічної дії на споруду проводиться незалежно від амплітудно-частотних характеристик системи "грунт-будівля". У зв'язку з цим набувають першочергового значення дослідження параметрів сейсмічних хвиль не лише за критерієм масової швидкості, а і з урахуванням амплітудно-частотних складових сейсмічних коливань.

Дослідженню підлягають тільки поверхневі хвилі Релея, оскільки вони порівняно з іншими (подовженими і поперечними) найбільш небезпечні для будівель масової забудови території України.

Шар ґрунту, на якому зведена будівля, переміщується під дією сейсмічних хвиль, розгойдує всю будівлю та окремі її частини. Разом із вимушеними коливаннями від дії сейсмічних сил у будівлі виникають власні коливання, які залежать від форми і геометрії споруди, а також від фізичних властивостей будівельного матеріалу. Накладення цих рухів викликає в будівлі динамічні зусилля, які можуть стати загрозою для її цілісності. В залежності від положення відносно епіцентру вибуху (приведеної відстані) поширення різних типів хвиль можна розділити на три характерні зони: ближня, перехідна та дальня.

За сейсмічною безпекою важливими є дві зони : перехідна і дальня. Саме вони розглядаються для обґрунтування вибору критерія впливу сейсмовибухових хвиль на будівлі [15-17].

Перехідна зона вибуху (відносні відстані від 6 до 16 м/кг<sup>1/3</sup>) характеризується наявністю позовжніх, поперечних та поверхневих хвиль і представлена у вигляді загасаючих коливань типу

$$a(t) = A_0 e^{-kt} \sin \omega t, \quad (11.1)$$

де  $a$  – зсув ґрунту;  $\omega$  – кругова частота.

Диференціальне рівняння коливань будівель буде

$$\mathbb{M} + f_0^2 x = A_0 [\omega^2 - k^2] \sin \omega t + 2k \omega \cos \omega t e^{-kt}. \quad (11.2)$$

Введемо позначення:

$$\frac{k}{\omega} = \varepsilon, \quad \frac{f_0}{\omega} = \eta;$$

$$A = \frac{(f_0 - \varepsilon^2)(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2}{(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2} A_0; \quad \rho = \frac{2\varepsilon(\eta^2 - 2 - 2\varepsilon^2)}{(1 - \varepsilon^2)(\eta^2 - 1 + \varepsilon^2) + 4\varepsilon^2}.$$

Рішення рівняння (11.2), що задовольняє початковим умовам при  $t=0$ ,  $x=0$ ,  $\dot{x}=0$ , буде мати вигляд:

$$x = -A \left[ \frac{\rho\omega - k}{f_0} \sin f_0 t + \cos f_0 t - (\rho \sin \omega t + \cos \omega t) e^{-kt} \right]. \quad (11.3)$$

Оскільки зазвичай частота коливань СВХ більше частоти власних коливань будівлі,  $\eta^2$  мала в порівнянні з одиницею. Якщо коефіцієнт загасання збурення  $k$  малий у порівнянні із частотою  $\omega$ , тобто  $\varepsilon=0$ , в цьому випадку  $A=A_0$ ,  $\rho=0$ , і, отже:

$$x = -A_0 [\sqrt{16k^2 + 1} \sin(f_0 t + \varphi_0) - e^{-kt} \cos \omega t], \quad (11.4)$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_0 = 4f_0$ .

Якщо величина коефіцієнта загасання хвиль  $k$  спів мірна з частотою коливань споруди, то при дії на споруди будуть виникати переважно власні коливання з амплітудою:

$$A = \frac{4k}{f_0} A_0. \quad (11.5)$$

Величина сили, що діє на будівлю, віднесена до одиниці її маси, дорівнює:

$$\frac{F}{M} = \frac{4\psi}{g} A_0 f_0 = \frac{k}{g} U. \quad (11.6)$$

Вираз (11.6) показує, що коливання будівлі і у перехідній зоні прямо пропорційне швидкості коливань часток ґрунту.

У зоні пружних деформацій ґрунтів, тобто на великій відстані від місця вибуху, де домінують поверхневі хвилі Релея (зона починається з наведених відстаней  $30 \text{ м/кг}^{1/3}$ ) діють коливання ґрунту сталого типу

$$a(t) = A \sin \omega t. \quad (11.7)$$

Диференціальне рівняння коливань системи з урахуванням загасання в ній будуть:

$$\ddot{x} + 2\lambda \dot{x} + f_0^2 x = A \omega^2 \sin \omega t$$

де  $\lambda$  – логарифмічний декремент загасання коливань будинку.

Загальний інтеграл його для випадку, коли загасання незначне:

$$x = \frac{A\omega^2}{\sqrt{(f_0^2 - \omega^2)^2 + 4\lambda^2 \omega^2}} \left[ \frac{\omega}{f_0} e^{-\lambda t} \sin f_0 t - \sin \omega t \right]. \quad (11.8)$$

Тут  $f_0 = \sqrt{f_0^2 - \omega^2}$  – частота власних коливань із урахуванням загасання. Передбачається, що  $f_0 \gg \omega$ , тобто приблизно частоти  $f$  близькі за значенням -  $f_0 = f_0$ .

При дії на будівлю сейсмічної хвилі, частота якої значно більша від частоти власних коливань будівлі, амплітуда змушених коливань будівлі мала в порівнянні з амплітудою її власних коливань і рішення (11.7) може бути написано у формі:

$$x = \frac{A\omega}{f_0} e^{-\lambda t} \sin f_0 t, \quad (11.9)$$

що говорить про пряму пропорційність переміщення будівлі швидкості коливань у сейсмічній хвилі ( $A\omega$  являє собою швидкість коливання ґрунту).

Якщо частота коливань в сейсмічній хвилі мало відрізняється від частоти власних коливань будівлі, тобто  $\omega/f_0 \approx 1$ , то рішення (5.8) може бути представлене у вигляді:

$$x = \frac{A\omega}{2\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \sin f_0 t. \quad (11.10)$$

В розглянутому випадку виконується умова резонансу, амплітуда коливань зі збільшенням часу дії вибухових хвиль зростає і при досить великому значенні  $t$  досягає найбільшої величини, рівної  $A\omega/2\lambda$ .

При цьому видно, що амплітуда коливань будівлі в умовах резонансу залежить лише від швидкості коливань у хвилі і коефіцієнта загасання коливань споруди.

Розглянуті випадки коливань у системі з одним ступенем волі СВХ дозволяють зробити висновок, що деформації і динамічні зусилля, що діють на нього, прямо пропорційні швидкості коливань сейсмічної хвилі і обернено пропорційні частоті власних коливань системи. Підтверджена пряма пропорційність швидкості коливань частинок ґрунту біля будівлі швидкості коливань у сейсмічній хвилі, оскільки являє собою швидкість коливання ґрунту.

Внаслідок теоретичних побудов одержано залежність для визначення допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаменту охоронної споруди та номограму перерахунку існуючої  $U_{cp}$  масової швидкості в допустиму  $U_{дон}$  в ґрунтовій основі охоронного об'єкту з урахуванням відношення  $T/T_0$  наведено на рис. 11.1.

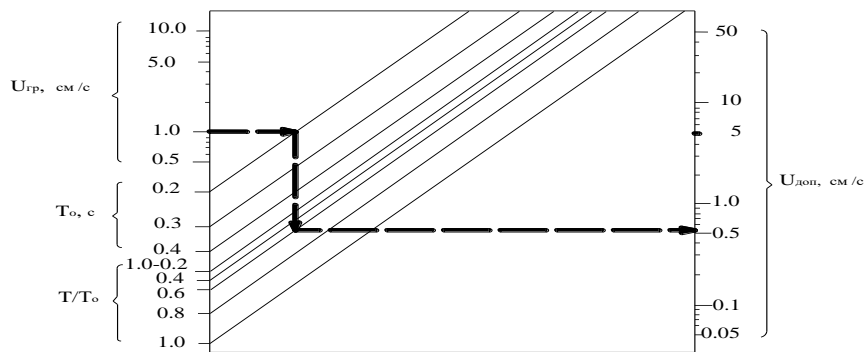


Рис. 11.1. Номограма перерахунку допустимої масової швидкості в ґрунтовій основі охоронного об'єкту за методом спектра дії

### Контрольні питання

1. Які критерії необхідні для визначення сейсмічної безпеки споруд?
2. Який тип пружних хвиль потребує першочергового вивчення?
3. Назвіть параметри, від яких залежить рівень власних коливань споруди
4. Назвіть характерні зони поширення пружних хвиль та їх розміри
5. Які типи хвиль виникають в перехідній зоні?
6. Які типи хвиль присутні у віддаленій зоні?
7. Відтворіть формулу запису загасаючих коливань в перехідній зоні
8. Відтворіть формулу запису диференціального рівняння коливань будівлі
9. Запишіть умову виникнення резонансу в будівлі

## Лекція 12

### Теоретичні підстави сейсмобезпеки експлуатованих будівель

Наведені в попередньому розділі аналітичні дослідження доповнені в промислових умовах проведенням масових вибухів на гірничо-видобувних підприємствах України.

Вивчення сейсмічної дії вибуху зарядів ВР на об'єкти здійснювалося із застосуванням методики багатоканальної реєстрації коливань, наведеної в Л- 2. Для одержання достовірних результатів вимірювань, різних параметрів сейсмічної дії вибуху дослідження проводилися за допомогою стандартних сейсмоприймачів типу СМ-3, призначених для реєстрації вертикальних і горизонтальних коливань, АЦП і ПК. Шляхом зіставлення значень вимірянних швидкостей коливань з існуючими за чинними нормативними документами для даного типу будівель визначались допустимі норми за впливом сейсмовибухових хвиль, тобто ступінь сейсмічної небезпеки масового вибуху.

Використання вимірювальної апаратури дозволяє з достатнім ступенем точності розрахувати швидкість коливань ґрунтової основи, на якій побудовано будівлі, але встановити допустиму їх величину таким шляхом проблематично. Це пов'язано з тим, що сейсмічний фактор за силою свого впливу може бути і малозначним, але вирішальним у загальному переліку причин появи залишкових деформацій (нових тріщин).

Систематичні обстеження стану будівель і споруд поблизу кар'єру виконувалися з метою виявлення його зміни після проведення масових вибухів. Перед проведенням вимірів у капітальних стінах кожного будинку фіксувалися всі тріщини та визначалися їх параметри (сумарна довжина і ширина). Після кожного експериментального вибуху контролювалися зміни параметрів існуючих тріщин, а всі новоутворені тріщини відзначалися. У такий спосіб була встановлена допустима для будівлі норма швидкості коливань, яка дозволяє розрахувати максимальну масу вибухової речовини на одне сповільнення.

Як показали результати експериментальних досліджень, швидкість коливань у ґрунтовій основі будівель при вибухах становила близько 1 см/с, що відповідно до СНіП-II-7-81 є допустимою величиною. Але у стінах багатьох будівель зафіксовано збільшення тріщин. Так, у житлових будинках селища Рокітне, розташованого на відстані 500 м від контуру Рокітнянського спецкар'єру, масові вибухи з допустимою за розрахунком масою заряду в 3000 кг на одне сповільнення викликають легкі пошкодження. В окремих сильно ослаблених тріщинами будинках, розташованих навіть на відстані понад 750 м від місця проведення підривних робіт, пошкодження набагато більші. Обстеженням технічного стану будівель і вивченням інженерно-геологічних характеристик ґрунтів в їх підвалинах визначено, що вони мають тріщини як просідного, так і сейсмічного походження. Як правило, такі споруди знаходяться на постійно вологих ґрунтах. Накопичені за час спостережень дані дозволили визначити кількість новоутворених тріщин



залежно від параметрів сейсмовибухової хвилі та від інженерно-геологічних характеристик ґрунтів у підвалинах будівель.

Практика використання існуючих критеріїв оцінки дії сейсмічної хвилі на будівлі також показала, що ступінь її небезпеки визначається певним діапазоном частот. Так, наприклад, за однієї і тієї ж швидкості зміщення частинок ґрунту в підвалинах будівлі на однаковій відстані існує нібито однакова за ступенем небезпека при високій (100 Гц) і низькій (10 Гц) частоті. Однак ці твердження суперечать практиці. У першому випадку небезпека для будинків буде меншою (проїзд потяга або вантажного транспорту), у другому – більшою (вибух заряду промислової ВР).

Аналіз сейсмічної дії масових вибухів в кар'єрах показав, що існуючий критерій небезпечності сейсмічної хвилі для будівель, ослаблених тріщинами, приймається таким, який не корелює цілком з рівнем пошкодження об'єкта залежно від резонансних характеристик ґрунту в його підвалинах і самого об'єкта. Тому за відомими методиками оцінки ступеня сейсмічної небезпеки не можна прогнозувати допустимі швидкості коливань багатьох типів будівель і споруд. Для реальної оцінки ослаблення міцності стін будівель потрібні додаткові відомості про ступінь пошкодження тріщинами, який визначається через коефіцієнт ослаблення міцності матеріалу капітальних стін будівлі.

Звідси випливає, що оцінку сейсмостійкості будівлі необхідно проводити за допустимою швидкістю коливань частинок її ґрунтової основи, оскільки цей показник найбільш надійно корелює з енергією, яка порушує цілісність будівлі внаслідок сейсмічної дії.

Таким чином, розрахувати сейсмічну безпеку вибуху звичайними методами статички споруд не можна. Обчислення слід вести за методами динаміки – за величиною допустимої швидкості коливань частинок ґрунтової основи будівлі, ослабленої тріщинами. Крім того, як показали дослідження, сейсмічний ефект від проведеного вибуху необхідно оцінювати за максимальною амплітудою швидкості, що виділена з осцилограми всього коливального процесу, в діапазоні наближених до резонансних частот для даного типу будівлі, ослабленої тріщинами. При цьому критерієм оцінки будівель на сейсмостійкість при вибуху слід вважати допустиму швидкість коливань частинок її ґрунтової основи з урахуванням коефіцієнта ослаблення міцності матеріалу капітальних стін через наявність тріщин. Вирахувана таким чином швидкість коливань дозволяє до проведення вибуху обчислювати сейсдобезпечні відстані.

З метою вивчення дії сейсмовибухових хвиль від короткосповільненого вибуху (КСВ) системи свердловинних зарядів ВР на будівлі, у тому числі і ослаблені тріщинами, розроблено методи оцінки їх технічного стану з визначенням коефіцієнтів тріщинуватості несучих стін  $K_{tp}$ ), визначення основних параметрів сейсмічних хвиль, які згідно з результатами досліджень ( $U_{дон}$ , см/с та  $T/T_0$ ) прийняті за критерій сейсдобезпеки, а також розроблено метод розрахунку допустимої маси заряду для одночасного підривання.

Визначення допустимої швидкості зміщення ґрунту (см/с) біля фундаментів будівель різного технічного стану враховує міцність матеріалу будівлі та ослабленість її тріщинами. При цьому з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунту, власних коливань будівлі допустима швидкість зміщення часток ґрунту визначається за формулою:

$$U_{доп} = \frac{[\sigma] \cdot K_{осл} \cdot \psi \cdot K_г}{\rho \cdot V_p \cdot K_{\Pi}}, \quad (12.1)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження для будівельного матеріалу або між окремими елементами будівлі, для яких визначається допустима швидкість зміщення.

Для цегляної кладки на цементі М50  $[\sigma]$  становить  $7,0 \times 10^5$  Па, для кладки із крупних шлакоблоків –  $23 \cdot 10^5$  Па, для штукатурки –  $0,9 \cdot 10^5$  Па;

$K_{осл}$  – коефіцієнт ослаблення тріщинами носійних стін будівлі;

$\psi$  – коефіцієнт втрати енергії при поширенні по будівлі коливального процесу (для будівлі з цегли  $\psi = 0,6$ , для будівлі з крупних шлакоблоків  $\psi = 0,7$ );

$\rho$  – щільність ґрунту в основі будівлі;

$V_p$  – швидкість поширення повздовжньої хвилі в ґрунті, см/с;

$K_г$  – коефіцієнт передачі коливань в сейсмічній хвилі від ґрунту до будівлі

$$K_г = (1,5 \cdot 10^{-2} r / Q^{1/3})^{1/5}, \quad (12.2)$$

де  $r / Q^{1/3}$  – приведена до маси заряду відстань від місця вибуху, м/кг<sup>1/3</sup>;

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт врахування частотних характеристик  $K_{\Pi} = 2,4 f_0 / f + 0,9$ ;

$f$  – частота коливань ґрунту;

$f_0$  – частота власних коливань будівлі.

Приведена відстань в формулі (12.2) обирається по сейсмічній Шкалі для вибухів відповідно до бальності, яка не викликає порушень і пошкоджень тих елементів будівлі, для яких за формулою (12.1) визначається допустима швидкість коливань.

Коефіцієнт ослаблення тріщинами несучих конструкцій визначається на основі коефіцієнта тріщинуватості носійних стін [18]:

$$K_{осл} = (1 - A K_{тр})^2, \quad (12.3)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який враховує форму деформації (для деформації типу тріщини  $A = 300$ );

$K_{тр}$  – коефіцієнт тріщинуватості будівлі (визначається на основі інвентаризації охоронної будівлі).

$$K_{Tp} = \frac{V_{Tp}}{V_0 + V_{Tp}}, \quad (12.4)$$

де  $V_{Tp}$  – об'єм тріщин ( $V_{Tp} = l \cdot d \cdot h$ , де  $l$ ,  $d$ ,  $h$  – середня довжина, ширина і глибина тріщини відповідно, м), м<sup>3</sup>;

$V_0$  – об'єм носійної стіни, м<sup>3</sup>.

Період власних коливань будівлі визначається за формулою:

$$T_0 = 0,265(h/\epsilon)^{0,265}, \text{ с}, \quad (12.5)$$

де  $h$  – висота будівлі, м;  $\epsilon$  – ширина, м.

Період коливань ґрунту, для різних типів хвиль визначають за осцилограмою, або за такими формулами:

під час вибуху свердловинних зарядів в повздовжній пружній хвилі

$$T_p = K_p Q_a^{1/6} (0,01l + 1), \text{ с}, \quad (12.6)$$

у поверхневій хвилі

$$T_R = K_R Q_a^{1/6} (0,015l + 1)(r/Q^{1/3})^\nu, \text{ с}, \quad (12.7)$$

де  $K_p$ ,  $K_R$ ,  $\nu$  – експериментальні коефіцієнти;

$Q_a$  – лінійна маса свердловинного заряду, кг/м;

$l$  – довжина свердловинного заряду, м;

$r$  – відстань від місця вибуху до пункту спостереження, м;

$Q$  – маса одного свердловинного заряду, кг.

Таким чином велике значення для оцінки динамічної стійкості будинку, на відміну від існуючих норм, при дії на нього СВХ має взаємозв'язок між частотними характеристиками будинку і вибухової хвилі, який був одержаний на основі експериментальних досліджень.

*Контрольні питання*

1. Перекажіть основні складові методики багатоканальної реєстрації коливань
2. Поясніть спосіб визначення ступеня сейсмічної небезпеки
3. Охарактеризуйте складнощі пов'язання швидкості коливань з залишковими деформаціями в будівлі
4. Які типи тріщин присутні в будівлях
5. Чи існує відповідність між рівнем небезпеки і швидкістю зміщення частинок ґрунту
6. Поясніть поняття коефіцієнта ослаблення
7. Визначте критерій сейсмічної стійкості будівель за наявності порушень міцності
8. В чому полягає метод оцінки технічного стану будівлі

9. Наведіть формулу визначення допустимої швидкості коливань з урахуванням стану будівлі
10. Надайте формулу для коефіцієнта передачі в сейсмічній хвилі
11. Як виглядає формула запису періода власних коливань будівлі
12. Вкажіть способи визначення періоду коливань ґрунту

## Лекція 13 Сейсмічна стійкість ослаблених тріщинами будівель

Перевірку наведених аналітичних залежностей виконано шляхом апаратурних замірів безпосередньо в будівлях III-го класу з різним їх технічним станом. При цьому період  $T$  та швидкість коливань ґрунту в фундаменті будівлі  $U$ , см/с, одержані з осцилограм, використовувались для визначення експериментальних коефіцієнтів  $K_p$ ,  $K_R$ ,  $\nu$  у формулах (9.6)–(9.7). Значення цих параметрів складають для граніту відповідно 0,01, 0,012, 0,38. Періоди власних коливань будівлі  $T_0$  визначались з осцилограм або згідно з формулою (12.5). З амплітудно-частотних характеристик сейсмовибухових хвиль одержано значення періоду максимальних амплітуд. Аналіз цих даних показав, що в основному періоди максимальних амплітуд перебувають у діапазоні 0,025–0,2 с (при частоті 5...40 Гц), власні періоди коливань будівель  $T_0$  складають 0,2–0,4 с (при частоті 2,5–5,0 Гц), а декремент загасання  $\lambda$  змінюється від 0,3 до 0,5. Ці дані відповідають більшості будівель масової забудови території України.

Одержані з осцилограм значення швидкості зміщення ґрунту у фундаменті будівлі та перераховані з урахуванням частотних характеристик коливання об'єктів згідно з аналітичними дослідженнями зображені на рис.13.1.

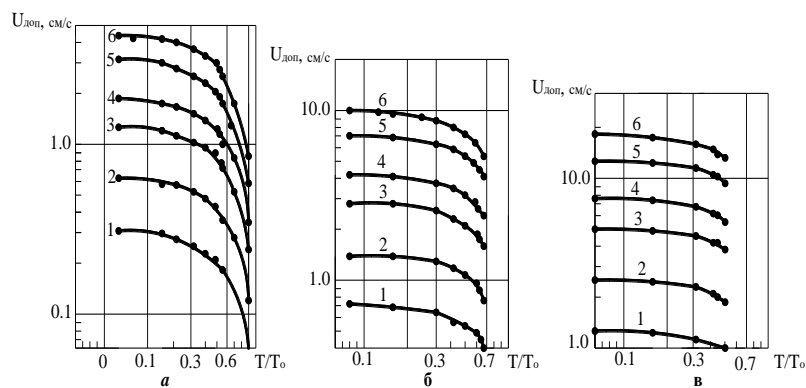


Рис.13.1 Графіки визначення нормативної допустимої швидкості коливань будівлі III класу з урахуванням величини відношення  $T_0/T$  при  $\lambda_{СБ} = 0,5$ : а –  $T_0 = 0,2$  с; б –  $T_0 = 0,3$  с; в –  $T_0 = 0,4$  с; 1–6 – уточнені з урахуванням  $T/T_0$  значення  $U_{\text{доп}}$  відповідно 0,5; 1; 2; 3; 5; 7 см/с, згідно з нормативними документами для будівель III класу

Із аналізу рис.13.1 видно, що ці результати (наприклад, в резонансній області коливань  $T/T_0 = 0,5...1,0$ ) значно відрізняються від даних існуючих нормативних документів, де не враховується частотний фактор. Наприклад, для одного і того ж значення  $U_0 = 1,0$  см/с, яке прийнято відповідно до існуючої Шкали (рис. 13.1) залежно від величини  $T/T_0$  і коефіцієнта демпфірування 0,5,  $U_{\text{доп}}$  може змінюватися в 1,5...5 разів. Це підтверджує необхідність врахування амплітудно-частотної характеристики коливальної системи "ґрунтова основа-будівля". Для оперативного

визначення допустимої швидкості коливань ґрунту біля фундаменту будівель залежно від частоти коливань ґрунту біля їх фундаменту розроблено номограму, приведено на рис.11.1.

Виконані аналітичні дослідження щодо впливу сейсмовибухових хвиль на будівлі також показали, що, крім величини відношення  $T/T_0$  ( $T$  – період коливання ґрунту,  $T_0$  – період власних коливань будівлі), важливим показником у спільному коливальному процесі є логарифмічний декремент загасання  $\lambda$ .

Використовуючи значення допустимої швидкості коливань ґрунту в фундаменті будівлі ( $U_{дон}$ , см/с), визначеною за формулою (12.1), розраховуються сейсмобезпечні параметри масових вибухів у кар'єрах. Максимально-допустима величина маси свердловинних зарядів ВР в групі ( $Q_{дон}$ , кг) при одночасному їх підриванні визначається за формулою:

$$Q_{дон} = \left( \frac{U_{дон}}{K} \right)^{\frac{3}{n}} r^3, \quad (13.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує умови вибуху і поширення сейсмовибухових хвиль (СВХ);

$n$  – показник затухання СВХ на відстані;

$r$  – відстань місця вибуху до об'єкта, що охороняється, м.

Наявність в будівлях тріщин враховувалась застосуванням залежностей (12.1), (12.3). Допустима швидкість коливань ґрунту біля фундаменту будівлі визначалась з врахуванням коефіцієнта ослаблення міцності матеріалу капітальних стін будівлі. Для сейсмічної оцінки впливу технологічних вибухів на будівлю потрібне знання міцності матеріалу, з якого вона побудована. В методиці використано експериментальні сейсмо- та частотограми для визначення параметрів сейсмовибухових хвиль: амплітуд, періодів коливань, швидкостей. Їх величини пов'язані з пошкодженнями конструкцій будівель, а також залежать від масштабу вибуху та відстаней.

Для будівель різного технічного стану допустима швидкість, крім оцінювання її в різних діапазонах частот, визначалась з урахуванням коефіцієнта тріщинуватості конструкцій споруди (12.4). Він визначався шляхом обстеження конкретних будівель та урахування коефіцієнта ослаблення, розрахованого за формулою (12.3). Експериментально досліджувався вплив швидкості коливань ґрунту в основі будівель на їх стійкість в різних діапазонах частот коливань, одержаних із осцилограм і спектрограм короткосповільненого підривання системи зарядів різної маси. На основі аналітичних і промислових досліджень для визначення головних критеріїв впливу сейсмовибухових хвиль на об'єкт розроблено норми оцінки сейсмобезпеки будівель з різним технічним станом (рис.13.2).

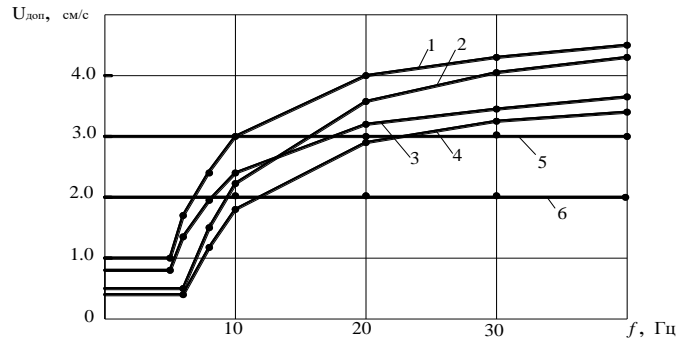


Рис. 13.2. Графіки визначення норм допустимої швидкості зміщення ґрунту в основі різного типу і технічного стану будівлі від частоти коливань в СВХ: 1, 2 – з цегли ( $f = 4$  Гц) і саману ( $f = 5,5$  Гц) відповідно, що не мають залишкових деформацій; 3, 4 – те ж саме, ослаблені тріщинами ( $K_{осл} = 0,8$ ); 5, 6 – допустимий рівень інтенсивності коливань для цегляної і саманної будівель згідно з існуючими нормативними даними відповідно

Для оперативного визначення масштабів промислових вибухів з допустимою швидкістю коливань ґрунту в основі охоронної будівлі, з урахуванням двох методів оцінки, розроблена комплексна номограма рис. 13.3.

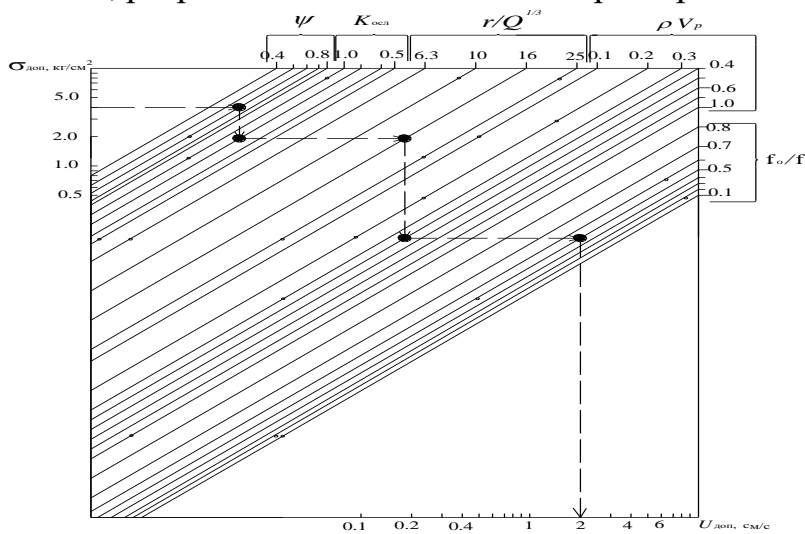


Рис.13.3. Комплексна номограма для визначення масштабів вибухів та допустимих величин швидкості коливань  $U_{доп}$  з урахуванням частотних характеристик коливань ґрунту і будівлі та її ослабленості тріщинами

Проведені експериментальні дослідження впливу сейсмічної вибухової хвилі на будівлі масової забудови (саманні, цегельні, у тому числі послаблені тріщинами) дозволили одержати такі величини швидкостей коливань в різних частотних діапазонах, які забезпечують повну цілісність будівель зазначених типів.

*Контрольні питання*

- 1. Назвіть числові значення амплітудно-частотних характеристик будівель масової забудови України*
- 2. Наскільки можуть відрізнятись виміряні та пораховані величини швидкості коливань?*
- 3. Які характерні співвідношення періодів коливань в резонансній зоні?*
- 4. Який параметр крім співвідношення періодів коливань є визначальним для характеристики коливального процесу?*
- 5. Наведіть і поясніть формулу для визначення маси зарядів, що підриваються одночасно*
- 6. Які конструктивні елементи споруди беруться в розрахунку сейсмостійкості в першу чергу?*
- 7. Порівняйте допустимі швидкості коливань для цегляних та саманних будівель*
- 8. На яких чинниках побудовано номограму допустимих швидкостей коливань?*



## Лекція 14 Прогноз сейсмостійкості об'єктів з різною конфігурацією фундаментів

У практиці ведення підривних робіт часто виникають проблеми в прогнозі сейсмостійкості охоронних об'єктів по контуру в залежності від конфігурації, яку має фундамент на якому він зведений. Найбільш помилковими є визначення гранично допустимих зарядів в ближній зоні, на сейсмостійкість охоронних об'єктів з різною конфігурацією їх фундаментів, коли застосовують методи розрахунку такі ж самі, як і для дальньої зони. При цьому одержують безглузді з точки зору практики результати. З відомих формул слідує, що в випадку необхідності на відстані 10 м від фундаменту будівлі можливо підірвати тільки заряд масою не більше 0,01 кг. Насправді в практиці буровибухових робіт в такому випадку застосовується заряд в 30–50 разів більшої маси.

Причина такого розходження полягає в тому, що механізм сейсмічної дії на будівлю в ближній і дальній зонах різний. Позначається локальний характер дії вибуху в ближній зоні, а також домінуючий склад об'ємних хвиль, який дає можливість ґрунтовій основі коливатись з високою частотою і малою протяжністю. Як було відмічено в попередніх розділах, якщо в якості критерію сейсмічної небезпеки прийнята швидкість зміщення, то це повинна бути швидкість зміщення фундаменту по всій його конфігурації, оскільки саме вона є кількісною характеристикою енергії, яка через ґрунтову основу передається на всю будівлю. Цей критерій не залежить від конфігурації фундаменту і типу конструкції споруди, а залежить тільки від умов вибуху, приведеної відстані та геологічних і геометричних обставин на шляху розповсюдження сейсмічних хвиль.

Стосовно дальньої зони, де швидкість зміщення ґрунту і фундаменту різняться незначно (в 1,5 рази) внаслідок податливості ґрунту, в якості критерію сейсмічної небезпеки прийнято швидкість зміщення в основі будівлі.

В ближній зоні швидкість зміщення на фундаменті значно менша від швидкості зміщення ґрунту під ним. Це пов'язано з тим, що при близьких вибухах короткі хвилі малої протяжності приходять до різних частин фундаменту із суттєво різними амплітудами, оскільки останні затухають обернено пропорційно відстані. Наприклад, для задньої стінки, незалежно від конфігурації фундаменту, амплітуди набагато більші, ніж для ближньої точки передньої стіни (рис.14.1).

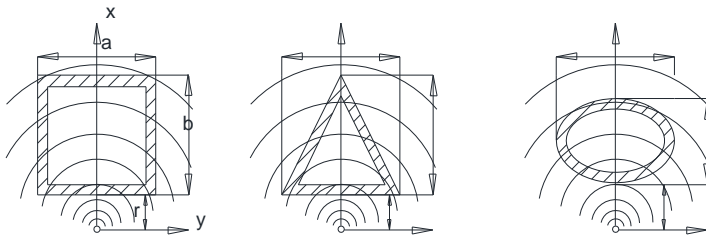


Рис.14.1. Схема сейсмічної дії, в ближній зоні, заряду через ґрунтову основу на охоронні об'єкти з квадратною, трикутною та еліптичною конфігурації їх фундаментів

Якщо розглядати фундамент будівлі, наприклад квадратної конфігурації, то під окремими частинами її (в кутах) ґрунт залишається практично нерухомим. Оскільки всі частини фундаменту і стіни пов'язані між собою, більшість елементів цієї коробкової конструкції чинить опір тому, щоб будівля була залучена в коливальний рух, відповідно швидкості коливань часток ґрунту в ближній до заряду точці. В випадку коли споруда (наприклад гребля) є фундаментом і всі її частини не пов'язані між собою, більшість елементів цієї конструкції будуть окремо реагувати на коливальний рух, відповідно швидкості коливань часток ґрунту в різних точках до заряду буде змінюватись. Це приводить до значного посилення сейсмічного прояву вибуху через ґрунтову основу в певних (небезпечних), для конкретної конфігурації фундаменту об'єкта, вузлах. Тому виникає завдання, щодо розробки методу розрахунку полів напруження (швидкостей коливань) навколо ґрунтової основи, в якій розташований фундамент з елементами конструкцій різної конфігурації і на які впливають сейсмічні хвилі від вибуху (особливо це стосується ближньої зони). Стосовно дальньої зони, то приведені в попередніх розділах методи розрахунку сейсмостійкості будинків і споруджень і інших охоронюваних об'єктів засновані на експериментальному визначенні швидкості коливань ґрунту тільки в його ґрунтовій основи. При цьому для оцінки сейсмостійкості досить вимірів швидкості коливань ґрунту в будь-яких точках ґрунтової основи навколо фундаменту, на якому побудований будинок або споруда. Оцінка сейсмостійкості за даною методикою не враховує хвильової картини по всій (конфігурації) границі контакту ґрунт-об'єкт і може бути застосована для об'єктів будь-якої конфігурації. Тобто в існуючих методах розрахунку сейсмостійкості за масовою швидкістю коливань ґрунтової основи фундаменту не враховується різна стійкість елементів його конструкції залежно від конфігурації. Це пояснюється відсутністю даних про розподіл динамічних полів напружень (масових швидкостей коливань) на елементах конструкцій об'єктів різної конфігурації.

При аналізі напружень у масиві із об'єктом розрахунки проводилися для найпоширенішої конфігурації дамб, фундаментів будинків та ін.) еліптичного, трикутного і квадратного перетинів. Отримані амплітуди напружень  $\sigma_{pp}$ ,  $\sigma_{p\theta}$  і  $\sigma_{\theta\theta}$  віднесені до  $\sigma_{yy/\infty} = (\lambda+2\mu)\alpha^2$ .

На рис.14.2 наведено залежності напружень  $\sigma_{pp}$ ,  $\sigma_{p\theta}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  від кута  $\theta$  при фіксованих частотах (цифри біля кривих – значення  $\alpha$ ). На цих графіках суцільна крива відповідає напруженню  $\sigma_{\theta\theta}$ , штрихова –  $\sigma_{pp}$  і штрих-пунктирна –  $\sigma_{p\theta}$

В області точок найменшого радіуса кривизни для об'єктів, які мають різну форму поперечного перерізу, виникають значні концентрації напружень, що у 3–8 разів перевищують напруження в падаючій хвилі. Найбільші напруження в падаючій хвилі  $\sigma_{pp}$  досягаються в точках найменшого радіуса кривизни. В інших точках контуру великим може бути як  $\sigma_{pp}$  так і  $\sigma_{\theta\theta}$ . Ці теоретичні розрахунки знайшли практичне підтвердження на практиці, коли від сейсмічної дії найбільші порушення (тріщинами) зафіксовані в кутах будівель з квадратним та прямокутним фундаментом (рис.14.2).

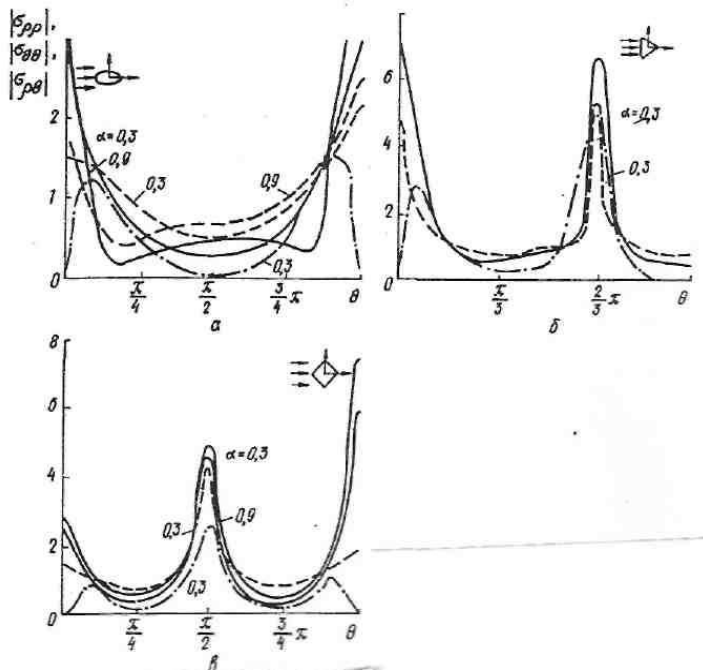


Рис. 14.2. Залежність амплітуди напруження від кута  $\theta$  при фіксованих частотах по контуру фундаменту охоронного об'єкту з еліптичною (а), трикутною (б) та квадратною (в) конфігурацією.

Викладене дозволяє стверджувати, що при прогнозуванні сейсмічного ефекту вибуху для об'єктів різної конфігурації в розрахунках сейсмостійкості охоронних об'єктів слід приймати дані замірів швидкості коливань в об'ємних хвилях для кутових точок.



Рис. 14.2 Характерні тріщини в кутах будинків від впливу сейсмовибухових хвиль,

При виконанні вибухових робіт свердловинні заряди, які підриваються миттєво, слід орієнтувати паралельно фланговим стінам (рис. 14.1) і не допускати випадків, коли хвилі падатимуть із сторони кутових точок.

*Контрольні питання*

- 1. Як відстань джерела вибуху від об'єкта впливає на прогноз його сейсмостійкості?*
- 2. Назвіть чинник, що впливає на прогноз сейсмостійкості в ближній зоні дії вибуху.*
- 3. Назвіть критерій, що не залежить від вимірювати швидкість коливань і типу породи.*
- 4. Порівняйте швидкості зміщення фундаменту і ґрунтової основи при різних відстанях від джерела вибуху.*
- 5. Як споруди різної конфігурації реагують на коливальний рух?*
- 6. Обґрунтуйте необхідність урахування конфігурації будинку при визначенні його сейсмостійкості*
- 7. В яких точках конструкції концентруються значні напруження?*
- 8. В яких місцях будинку першими виникають порушення?*
- 9. В яких точках об'єкта слід першочергово вимірювати швидкість зміщення?*

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко В.В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України / В.В. Бойко // – К.: ТОВ «Видавництво Сталь» – 2012. – 235с.
2. Бойко В.В. Національний стандарт України. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки / Бойко В.В., Воротеляк В.Є., Воротеляк Г.А. Кузьменко А.О. // ДСТУ 4704:2008. – К: Держспоживстандарт України. – 2009. – 11 с.
3. Здешиц В.М. Измерение векторной скорости сейсмических колебаний с помощью запоминающего цифрового осциллографа TDS-2014 / В.М. Здешиц // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2007. – Вип. 16. – С.191–196.
4. Справочник взрывника. / Б.Н.Кутузов, В.М.Скоробогатов, И.Е.Ерофеев и др. под. общ. ред. Б.Н.Кутузова. М.: Недра, 1988.-511с.
5. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. – М.: Недра, 1972. – 45 с.
6. Бойко В.В. Динамічні дії сейсмодивбухових хвиль на стійкість ґрунтових укосів / Хлевнюк Т.В., Чала О.М./Проблеми охорони праці в Україні: Зб. наук. праць. – К.: ННДПБОП, 2011. – Вип. 17. – С. 261–267.
7. Исмаилов Т.Т. Обоснование и разработка технологии взрывных работ, обеспечивающей устойчивость горных выработок при комбинированной отработке рудных месторождений: автореф. дис... на соискание уч. степени д. техн. наук: спец.:25.00.20 –"Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика" / Т.Т. Исмаилов. – М., 2010. – 35 с.
8. Кузьменко А.А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А.А. Кузьменко, В.Д. Воробьев, И.И. Денисюк, А.А. Даустас. – М.: Недра, 1990. – 173 с.
9. Заурбекова Н.Д. Обоснование устойчивости бортов карьеров с учетом запредельной деформируемости горных пород: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.22 «Геотехнология»/Н.Д. Заурбекова – Алматы: 2010.-20с.
10. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы.-М.:Стройиздат, 1977.-59с.
11. Падуков В. А. Горная геомеханика: Учеб. пособие / Падуков В. А. – Санкт-Петербургский горный ин-т. – С-Пб, 1997. – 134с.
12. А. с. (СССР), Способ взрывного разрушения горных пород / Ф.И. Кучерявый, Э.И. Ефремов, Ю.Ф. Кучерявый, Б.Н Мяделец / Госком. СССР по делам изобр. и откр. 2476203, 1979.
13. А. с. №1162969 СССР. Способ определения сейсмоопасных зон в трещиноватых горных массивах / А.О. Вовк, В.В. Бойко, Н.В. Кривцов, Ф.И. Кучерявый. – №3623214; заявл. 6.06.83; опубл. 22.02.85. Бюл. № 23. тины при взрывах. – Сб. Колебания земляных плотин. – М.: Наука, 1967.
14. Кучерявый Ф.И. Принципы составления сейсмического канала и его тарирование различными методами/Ф.И.Кучерявый// «Разработка нерудных

месторождений», 1971, №12.-С.51-56

15. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских – М. : Наука, 1978. – 343 с.

16. Бойко В.В. О критериях сейсмической опасности промышленных взрывов / В.В. Бойко, А.А. Кузьменко, Т.В. Хлевнюк // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – 2005 – № 12. – С. 45–52.

17. Кугель М. Розробка методів прогнозування і попередження зсувів в укосах на підроблюваних територіях: автореф. дис.на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.09 – "Механіка ґрунтів та гірських порід" / Кугель М. – К., 2002. – 20 с.

18. ДБН В.1.1-12:2006 « захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України».

19. Кравец В.Г. Оценка критериев сейсмоопасности при взрывных работах и горных ударах/В.Г.Кравец// Труды междунар. конф. «1X Школа геомеханики 2009», Польша, Гливице: 2009.-С.113-137