

УДК 622.28(043.3)

О. О. ВОВК (доктор техн. наук, проф.)

С.В. ЗАЙЧЕНКО (доктор техн. наук, доц.)

В.В. ВАПНІЧНА (канд. техн. наук, доц.)

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ СЕЙСМІЧНИХ ПРОЯВІВ ТА ЕФЕКТИВНІ ПРОТИСЕЙСМІЧНІ ЗАХОДИ

В статті розглянуто джерела виникнення небезпечних сейсмічних проявів в процесі розробки вугільних та інших родовищ корисних копалин та досліджено методологічні підходи до визначення розмірів зон деформації в підроблюваних масивах навколо осередку гірничого удару для підвищення ефективності протисейсмічних заходів.

Ключові слова: сейсмічні хвилі, гірничі удари, радіальні напруги, тангенціальні напруги, кластеризація.

Вивчення динамічних явищ в гірничому масиві у формі сейсмічних коливань є важливою і надзвичайно складною багатофакторною задачею, спрямованою на вироблення надійних прогнозів стосовно сейсмобезпеки умов експлуатації поверхневих і підземних інженерних об'єктів, впливу на деформації поверхні Землі, природних гірських схилів і дна водойм. Джерелами, емітуючими такі коливання, можуть бути технологічні вибухи зарядів ВР для руйнування гірничої породи, гірничі удари, спеціальні вибухи зарядів в місцях концентрації напружень в районі можливого вогнища гірничого удару для їх локалізації або пониження енергетичного рівня, переміщення вогнища вглиб розроблюваного пласта або вміщуючих порід. Вирішальним фактором у дослідженнях цих процесів є розробка науково-обґрунтованих методик з максимальним урахуванням особливостей формування та руху сейсмічних хвиль, властивостей гірського масиву і т.п.

При розгляді сейсмічних проявів, як наслідків гірничого удару, конфігурація осередка, а відповідно і початковий профіль хвилі, в більшості випадків може бути зведений до сферичного (або близького до нього) виду при локальних ударах, або до лінійно – протяжного (наприклад, вповодж лінії очисного вибою), поступово набуваючи циліндричні, а в подальшому і сферичні обриси [1]. Розгляд сейсмічних задач при дії вибуху зарядів також пов'язаний з великими труднощами через різноманітність і складності просторового розосередження зарядів, їх ініціювання в різних режимах, положення по відношенню до об'єктів сейсмічного впливу. Вибухові роботи мають різне виробниче призначення: а) для руйнування (подрібнення) гірської породи до стану, придатного для вантаження; для підвищення коефіцієнтів проникності та фільтрації простору навкруги свердловини при дегазації; б) при розробці вибухових методів попередження або зниження динамічних проявів у районі ведення капітальних, підготовчих і очисних робіт: струсно-камуфлетного, камуфлетно-струсно-відбійного висаджування, вибухового торпедування. Незважаючи на різноманітність завдань технологічного плану, що досягаються шляхом реалізації відповідним їм схем ведення висаджувальних робіт, загальним для них є процес зміни напружено-деформованої картини середовища, опис якої можливо з використанням однієї з концепцій руйнування. Найбільш поширеною є енергетична теорія Гріффітса, відповідно до якої процес руйнування породи відбувається за певний проміжок часу, необхідний для накопичення пружної енергії. Вона є однією з перших спроб врахувати вплив масштабного чинника, тобто наявності дефектів, що мають місце в реальних умовах. Це означає, що характеристики міцності гірських порід не є величинами інваріантними, тобто вони змінюються при переході від одних умов випробування (зразків) до інших (у масиві, в тому числі, на різних глибинах). Відповідно до теорії Гріффітса крихкий матеріал розглядається як суцільне середовище, але містить мікротріщини. Важливо відзначити, що в твердому тілі передбачається накопичення потенційної енергії в межах пружних деформацій, тобто напруга всередині тіла (макрообсязі) не обов'язково зникає з припиненням хвильового руху. Має певне значення і відомий ділатантний ефект, що полягає в тому, що в зернистих гірських породах при нерівномірному просторовому навантаженні в докритичних межах має місце ділатантне розпушування гірських порід,

що свідчить про взаємний зв'язок і взаємний вплив кульової і девіаторної компонент тензора напруг. Оскільки воно в цьому об'ємі пов'язано з підростанням мікротріщинуватості, як реального фактора в структурі гірської породи, його необхідно враховувати. Виходячи з цього руйнування, як процес втрати породою її несучої здатності, згідно з енергетичною теорією Гріффітса, має місце у випадку, коли вивільнена пружна енергія при поширенні тріщини перевершує енергію, необхідну для утворення нових поверхонь. Принциповим положенням теорії є твердження, що існуюча тріщина буде поширюватись, якщо повна потенційна енергія системи при цьому зменшується. На другій (критичній) стадії процес деформування описується теорією квазікрихкого руйнування, в той час як на першій стадії (докритичній) надзвичайно велику роль відіграє фактор часу. Механізм передачі енергії зовнішніх сил в точках дислокації характеризується певною інерційністю і тому має місце певний (інкубаційний) період часу, пов'язаний з процесом поглинання енергії пластичними деформаціями, що сповільнюють утворення нових поверхонь на докритичній стадії. Звідси випливає, що максимум руйнівних деформацій всього масиву, наприклад, при вибуху, відстає від максимуму напруг і руйнування порід у зоні радіальних тріщин відбувається з запізненням по відношенню до фронту максимальних (радіальних) напруг. Якщо припустити, що об'ємні деформації розвиваються в часовому інтервалі, відмінному від деформацій формозміни (різні інкубаційні періоди), оскільки критичні величини радіальних і тангенціальних напружень різні ($\sigma_r > \sigma_\theta$), то наявність двох координат (відстаней від стінки зарядної камери) зародження пружних коливань двох різновидів є досить ймовірною. Першою з них буде межа, де радіальна напруга стає рівною або меншою міцності породи на стиск (імовірно, це зовнішня межа зони подрібнення), і другий - межа, де окружні напруги досягають значення міцності породи на відрив (розтягнення) [2], тобто $\sigma_1 = \sigma_{відр}$. У цьому випадку утворюється тріщина вздовж площини дії розривних напруг (σ_1). Макроруйнування зсуву виникає в елементі породи, якщо хоча б на одному з перерізів середовища дотичні напруження τ_{max} досягають зсувної міцності σ_s . Таким чином, властивості міцності порід на стискання при інших рівних умовах впливають на розміри зон незворотних деформацій - випромінювачів поздовжніх хвиль. Частота зсувної хвилі не сильно відрізняється від частоти повздовжньої хвилі на зовнішній межі зони подрібнення, хоча за швидкістю відрізняється в «n» раз і загасає, на відміну від повздовжньої, за законом $r^{-1,4}$ [3]. У табл. 1 наведені показники коефіцієнта крихкості для гірських порід різних категорій. При вивченні механізму зародження та реалізації динамічної події поблизу гірничих розробок енергетичну концепцію по Гріффітсу доцільно доповнити положеннями кінетичної концепції міцності академіка Жукова С.М., яка полягає у тому, що при відомих певних закономірностях явища, стадій його розвитку на основі вимірів можна визначити, наскільки близький об'єкт до остаточного руйнування. Процес накопичення енергії та зростання тріщин розділяється на дві основні стадії - стаціонарну і нестаціонарну (рис. 1). Перша пов'язана з утворенням і накопиченням дефектів (мікротріщин) в породі, наприклад тріщин, розміри яких обумовлені структурною неоднорідністю (гетерогенністю) самого матеріалу.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта крихкості K_{xp} залежно від категорії порід за СНіП і коефіцієнта міцності f за Протод'яконовим

Категорія породи за СНіП	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Коефіцієнт f міцності породи за Протод'яконовим	1,5-2	3-4	4-5	5	8-9	12-15	17-18	20
K_{xp}	15	17	18,5	20	21	22,5	24	25
Міцність породи на відрив, $Па \cdot 10^{-5}$	10-13	17,6-23,5	21,6-27	25	38,1-42,9	53,3-66,7	70,8-75	80

Виникаючи в місці перенапруження, вони швидко проростають до межі даного структурного елемента (зерна, блоку) і загальмовуються через різку зміну умов їх розвитку, тобто стабілізуються. У навантаженому тілі число таких дефектів зростає, причому кожен з них практично не впливає на міцність характеристики матеріалу. При досягненні деякої порогової концентрації пошкоджень руйнування переходить у другу нестационарну фазу з утворенням ансамблів тріщин (кластерів), де дефекти майже дотичні відносно один одного і можуть об'єднуватися. Якщо утворені кластери стабілізуються, то накопичуються інші тріщини з новими умовами кластеризації до моменту виникнення нестійкого кластера, здатного розвиватися самостійно і прискорено, як активний осередок руйнування. Формування кластерів супроводжується акустичною емісією з певними енергетичними рівнями - невеликими на першій стадії і набагато більш інтенсивними на стадії, коли вже починають об'єднуватися кластери і процес вступає в фазу нестабільного випромінювання - провісника гірничого удару (на рис. 1: IV - V стадії розвитку). Аналіз кластеризації виконується загальноприйнятими статичними прийомами і є найважливішою складовою в оцінці формування осередку гірничого удару.

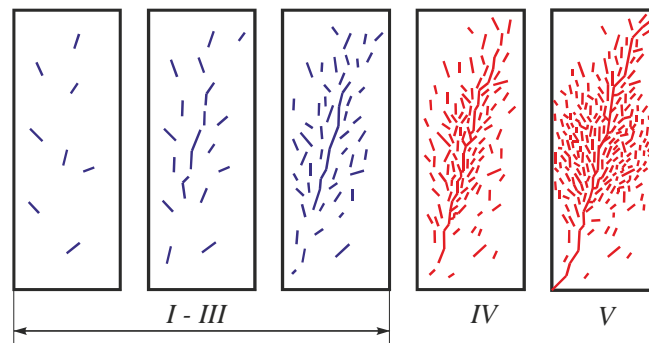


Рис. 1. Зародження і розвиток тріщин зі зростанням напруг: I - III - стадії накопичення дефектів (стаціонарна фаза); IV - V - стадії росту тріщин (нестационарна фаза)

Деякі методичні особливості дослідження сейсмічних коливань при вибухах та гірничих ударах. При вивченні хвильових процесів в ідеально пружному середовищі приймаємо розрахункову схему опису картини поширення збурень у деформованому міцному середовищі, запропоновану в роботі [4], в наступному трактуванні: у міру падіння напруг, викликаних тиском продуктів вибуху на стінку зарядної камери, швидкість поширення фронту подрібнення вирівнюється, а потім стає менше швидкості повздовжніх хвиль. У підсумку цей фронт вироджується і подальший рух відбувається в рамках моделі Гука у вигляді повздовжньої хвилі. Отримана з умов на фронті подрібнення формула для швидкості його розповсюдження на стадії, близькій до виродження, наведена в [4]. Однак, прийняття в якості вихідної моделі пружного середовища призводить до того, що за межами зони подрібнення час наростання амплітуди скорочується з відстанню, що не знаходить експериментального підтвердження. Тому, в аналізі хвильових рухів слід замінити в узагальненій пружно-пластичній моделі пружні співвідношення квазіпружними, з уточненням хвильової картини за межами зони подрібнення. Внаслідок врахування релаксаційних і зсувних механізмів в прийнятій квазіпружнопластичній моделі передній ударний фронт на пружному провіснику вироджується швидше з відстанню і епюра масової швидкості стає безперервною кривою, а залежність часу наростання з відстанню показує зростання його за межами зони подрібнення до межі неруйнуючих навантажень, де коефіцієнт загасання амплітуд приймає значення порядку 1,6 (у той час, як у першій моделі воно є нереальною величиною, приблизно рівною 1). Як бачимо, аналітичні побудови для встановлення часових параметрів руху пружно-пластичних хвиль поблизу заряду носять лише наближений (оціночний) характер і повинні уточнюватися конкретними експериментами, або найчастіше за все в даний час замінюються емпіричними (напівемпіричними) співвідношеннями [5].

Принципова схема розповсюдження збурень в руйнуючому твердому середовищі та її стану в характерних зонах наведена на рис. 2. Розглянемо основні положення теорії руйнування при динамічних навантаженнях, що описують механічні ефекти вибуху для вироблення підходів до визначення розмірів зон деформації в рамках зонної моделі Родіонова В.М.

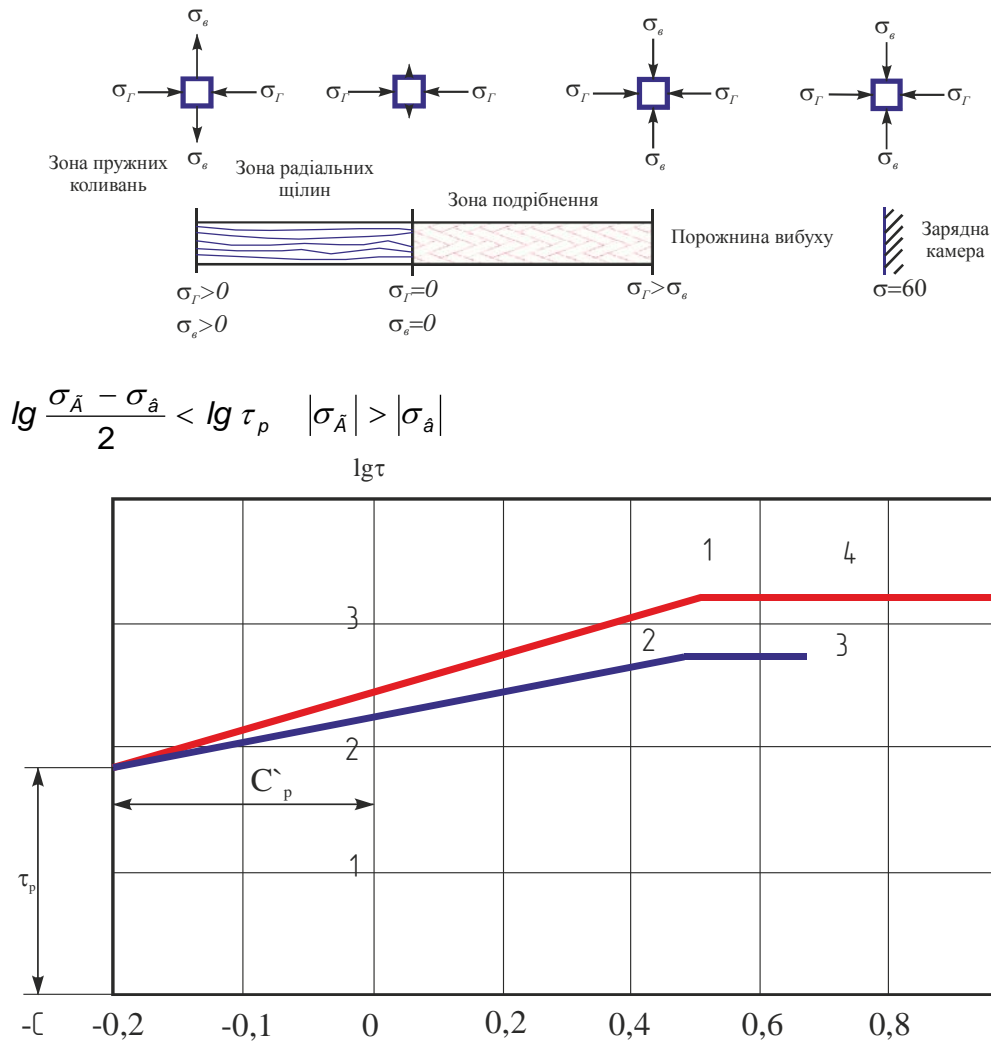


Рис. 2. Умови граничних станів (по А.Н. Ставрогіну): 1 - умова міцності; 2 - умова пружності; 3 і 4 - перехід до необмеженого збільшення деформацій при постійному навантаженні; C - відношення мінімальної розтягуючої (ϵ_{\min}) і максимальної (ϵ_{\max}) деформації $C = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$

Схема на рис. 2, на додаток до викладеного раніше, ілюструє ряд положень, з урахуванням яких представляється можливим отримати більш точні параметри зон деформації навколо осередку. З нього випливає, що на деякій відстані від центру вибуху ($5r_3$ приблизно при розгляді сферичного джерела) радіальні σ_r і тангенціальні σ_θ компоненти стискаючих напруг приблизно рівні ($\sigma_r \approx \sigma_\theta$) і напруга близька до гідростатичної. Починаючи з відстані, приблизно $14r_3$, тангенціальна компонента напруги стає розтягуючою, а радіальна залишається стискаючою, руйнування середовища відбувається у формі радіальних тріщин*.

На межі зон подрібнення і радіальних тріщин зв'язок між C і $\lg \tau$ (рис. 2) визначається ділянкою графіка рівняння $\tau_n(C)$ до значення $C = 0$:

$$\lg \tau_{\max} = \lg \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

Теорія руйнування окрім обґрунтування конкретного прийнятого варіанта механізму зародження і розвитку тріщин, повинна доповнюватись однією з теорій граничного стану - гіпо-

тезою міцності у вигляді зв'язку максимальної дотичної напруги з нормальною, без чого неможливо розділення спектру пружних об'ємних хвиль як в початковий момент, так і в процесі руху по пружному середовищу. Найбільш повно умови крихкого руйнування відображає гіпотеза, запропонована Е. Маріоттом у вигляді:

$$\sigma = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq \sigma_p, \quad (2)$$

де σ_p - межа міцності зразка при одноосному розтязі.

Необхідно проаналізувати умови граничного стану середовища з пластичними властивостями, що вкрай важливо при розгляді задач в середовищі на глибоких горизонтах або в наосах. Губером для цих умов запропонована гіпотеза потенційної енергії формозміни, а якою визначається, що граничний стан настає при досягненні енергією формозміни (\mathcal{E}_ϕ) деякої граничної величини:

$$\mathcal{E}_\phi = \mathcal{E}_{y_0} - \mathcal{E}_\nu, \quad (3)$$

де \mathcal{E}_{y_0} - повна питома робота на деформацію одиниці об'єму; \mathcal{E}_ν - питома робота зміни об'єму, при $\nu \rightarrow 0,5$ вона перетворюється на нуль.

Одним з важливих напрямків розвитку промислової сейсміки слід вважати розробку методики оцінки сейсмонебезпеки по силовому і енергетичному фактору, яка дозволить враховувати дисипативні втрати через коефіцієнт поглинання і оцінити масштаб відхилень від розрахункових параметрів енергетичної подібності в плані можливості його застосування і в для кожних конкретних умов.

* *Обґрунтування даної концепції розвитку деформаційних процесів у твердих середовищах міститься в роботах академіка Е.І.Шемакіна і використовується в [5] при дослідженнях хвильових процесів, характерних гірничим ударам.*

Висновки

1. Оцінка інтенсивності сейсмічних коливань для підвищення ефективності проти сейсмічних заходів повинна виконуватися на основі критеріїв, що найбільш повно ідображають реальну картину впливу сейсмічних хвиль і реакцію на них об'єкта, який треба захищати. У цьому зв'язку поряд із загальноприйнятою концепцією оцінки сейсмонебезпеки за фактором масової швидкості необхідно розвивати напрямки промислової сейсміки на основі силових і енергетичних критеріїв, з урахування дисипативних втрат, через що змінюється коефіцієнт поглинання впововж променя хвилі.

2. При розгляді завдань деформації породи під впливом силового імпульсу слід виходити з енергетичної концепції Гріффітса, а при вивченні механізму незворотних деформацій у місцях концентрації напруг (осередку) з подальшою реалізацією динамічних подій - кінетичної концепції міцності поведінки породи в силовому полі акад. Жукова С.М.

3. Виходячи з кінетичної концепції міцності необхідно внести зміни в діючі методичні підходи до вивчення динаміки хвильових процесів, прийнявши гіпотезу про наявність двох координат зародження об'ємних хвиль (радіусів випромінювача) для кожної з них.

Бібліографічний список

1. Вовк А.А. Сейсмическое действие взрыва цилиндрического заряда / А.А. Вовк, А.А. Кузьменко // Прикладная гидромеханика. – 2001. – Т. 3(75). – №4. – С. 3–12.
2. Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstążków górotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeżnym obszarze niecki obniżeniowej / M. Chudek, W. Krawiec, A. Wovk i in). – Wydawnictwo Politechniki śląskiej. – Gliwice. – 2003. – 535 s.
3. Мосинец В.Н., Богацкий В.Ф. Основные научно-технические проблемы сейсмики ближней зоны / В.Н. Мосинец, В.Ф. Богацкий // В сб. Взрывное дело №85/42 «Сейсмика промышленных взрывов». – М.: Недра. – 1983. – № 85/42. – С. 89–101.
4. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А. Вовк, Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев, и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 228 с.

5. Вовк О.О. Управління напружено-деформованим станом підроблюваного масиву для підвищення стійкості природних і інженерних об'єктів при сейсmodинамічних навантаженнях: дис... д.т.н.: 05.15.09 / Вовк Оксана Олексіївна. – К., 2014. – 347 с.

Надійшла до редакції 01.04.2016

О.А. Вовк, С.В. Зайченко, В.В. Вапничная

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОТИВОСЕЙСМИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

В статье рассмотрены источники возникновения опасных сейсмических проявлений в процессе разработки угольных и других месторождений полезных ископаемых и исследованы методологические подходы к определению размеров зон деформации в подрабатываемых массивах вокруг очага горного удара для повышения эффективности противосейсмических мероприятий.

Ключевые слова: сейсмические волны, горные удары, радиальные напряжения, тангенциальные напряжения, кластеризация.

O. VOVK, S. ZAYCHENKO, V. VAPNYCHNA

National technical university of Ukraine "KPI", Kiev

MECHANISM OF DANGEROUS SEISMIC MANIFESTATIONS ORIGIN AND EFFECTIVE ANTI-SEISMIC MEASURES

The article describes the sources of hazardous seismic manifestations in the process of coal and other mineral deposits development and methodological approaches on determining of deformation zones sizes in the rock massifs around the hearth of the rock burst were investigated to improve the efficiency of anti-seismic measures.

Key words: seismic waves rock bursts, radial and tangential stresses, clusterization