**2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**2.1 Аналіз моделей руйнування гірських порід вибухом**

Розглянемо *механізм дії вибуху у твердому середовищі* описаному Мінделі Е.О. та Левчик С.П. [30].

При вибуху заряду в середовищі виникають збудження у вигляді хвиль напруги, інтенсивність яких залежить як від властивостей ВР, і в першу чергу від щільності і швидкості детонації, так і від властивостей ГП. При цьому протягом декількох мікросекунд тиск на стінки зарядної камери (шпуру, свердловини) досягає величин порядку (2 – 4)·105 кг/см2, а температура зростає до декількох тисяч градусів. Ударна хвиля, що утвориться в результаті детонації заряду, проходячи через середовище, руйнує його. Найбільш сильні руйнування у вигляді переподрібнення і пластичних деформацій спостерігаються в безпосередній близькості від заряду ВР. На ці руйнування витрачається велика частка енергії ударної хвилі через значні втрати енергії на розсіювання і подолання внутрішнього тертя між частками середовища (дисипативні втрати). З віддаленням від зарядної камери енергія ударної хвилі зменшується, однак, вона ще досить велика для того, щоб зробити порушення зв'язку між окремими частками середовища, утворивши тріщини, або розширити порожнину при висадженні в пластичних середовищах. Ударна хвиля в цій зоні є хвилею пружних деформацій. Надалі, поширюючись по породі, ударна хвиля перетворюється в сейсмічну або звукову, енергія якої вже недостатня для розриву цілісності середовища або виникнення деформації.

Після проходження ударної хвилі в тріщини, що утворилися, спрямовуються продукти детонації, що володіють на першій стадії розширення досить високою енергією. Тиск газів вибуху розсовує тріщини, відокремлює шматки породи і надає їм поступальний рух [30].

Таким чином, при вибуху частина потенційної енергії ВР трансформується в ударну хвилю, частина залишається у вигляді енергії газової бульбашки, а частина витрачається на теплові, хімічні та інші втрати.

Фізично глибоко обґрунтованою та одночасно наочною є *модель руйнування гірської породи Г. И. Покровського*. Якісну картину дії вибуху на середовище він представляє в такий спосіб [34]: порода, що безпосередньо примикає до заряду, на незначний проміжок часу сильно стискується; надалі частки середовища одержують рух по радіальних напрямках і зміщаються слідом за фронтом хвилі деформацій. У результаті навколо заряду утвориться зона сильно деформованої породи. У цій зоні в масиві виникають значні напруги, що звичайно перевершують тимчасовий опір розриву і приводять до появи радіальних тріщин. Але зі збільшенням відстані від заряду напруги зменшуються і нові тріщини не утворяться.

При вибуху в результаті збільшення порожнини, в якій знаходиться зарядом, тиск газів падає і сильно стиснута порода поблизу заряду починає переміщатися убік центра порожнини, що обумовлює появу концентричних тріщин. Коли хвиля стиску доходить до поверхні оголення, що знаходиться поблизу поверхні, частки вільно зміщаються в її сторону. Інтенсивний рух породи убік вільної поверхні передається усе більш віддаленим від неї шарам середовища, усередину породи поширюється хвиля розрідження, що викликає розтягуючи навантаження. Тріщини, що утворяться під дією хвилі розрідження, розвиваються перпендикулярно напрямку її поширення. Хвиля розрідження, що виникає поблизу плоскої поверхні середовища, поширюється так, ніби вона йшла від заряду, що представляє собою дзеркальне відображення реального заряду. У результаті з'являються руйнування, викликані зворотним рухом поля навантажень.

Особливої уваги заслуговує *теорія руйнування гірської породи О. Е. Власова* [8], який показав можливість наближених рішень, прийнявши допущення про миттєвість передачі енергії вибуху навколишньому середовищу і про нестисливість середовища. При цих умовах енергія вибуху передається середовищу у виді кінетичної, а середовище в момент передачі поводиться як нестислива ідеальна рідина, поводження якої описується рівняннями гідродинаміки. Зокрема, розподіл потенціалу швидкості часток середовища описується диференціальним рівнянням Лапласа, що дозволяє заміняти складні аналітичні розрахунки експериментальним визначенням полюси потенціалу на моделі методом електро-гідродинамічної аналогії (ЕГДА). Початкове поле кінетичної енергії з урахуванням форми і розташування зарядів дає можливість оцінити розміри зон можливих руйнувань середовища вибухом. Розділяючи початкову кінетичну енергію середовища на енергію поступального руху й енергію деформації, О.Е. Власов розробив основи розрахунку дроблення гірських порід вибухом, що дозволяють методами класичної механіки визначити розрахунковий гранулометричний склад висадженої маси і приблизно оцінити дію вибуху, що дробить, не тільки сферичні, але і циліндричні заряди, які широко застосовують у практиці гірської справи. За допомогою моделі, яку пропонує автор, можна оцінити лише кінцеві результати дії вибуху, але не можна розглядати послідовно всі зміни та деформації що протікають в середовищі. Такий підхід до рішення задачі відмінний від звичайних класичних методів механіки суцільних середовищ, де основою незалежної змінної служить час.

Зовсім інший *підхід до рішення задачі руйнування гірського масиву* вибухом запропонував *А.Ф. Суханов* [36], що розділив дію вибуху на відділення частини масиву, що руйнується по бічній поверхні лінії вибуху і на подолання сили ваги породи, що розривається, з одночасною витратою частини енергії на подрібнення.

Величина корисного зусилля Р, створюваного тиском продуктів вибуху, що дорівнює сумі двох сил: сили опору бічної поверхні обсягу масиву, що руйнується, Р1 і сили ваги обсягу породи, що підривається, Р2 відповідно до формули (2.1) та (2.2):

(2.1)

(2.2)

де - тимчасовий питомий опір породи на відрив;

*H* - глибина закладення заряду;

- половина кута розкриву лінії вибуху;

- об'ємна вага породи в масиві.

Питома витрата ВР на руйнування1 м3 породи з урахуванням ступеня подрібнення визначається співвідношенням (2.3)

(2.3)

де *Q* – маса заряду;

*V* – обсяг зруйнованої породи;

*q* – питома витрата ВР на одиницю поверхні відриву породи від масиву;

*S* – площа відриву;

*q2* – питома витрата ВР на одиницю об'єму породи для подолання сили ваги.

Доречно відзначити, що запропонована схема відділення від масиву призми викиду є наближеною до реального процесу руйнування середовища при вибуху.

Цілеспрямовано впливати на параметри вибухового імпульсу можна не тільки застосуванням зарядів різної конструкції, але і вибором типу ВР. У цьому відношенні цікаві розвинуті *положення по механізму дії гранульованих вибухових речовин Г.П. Демидюком* [12].

Гранульована структура вибухових речовин, різко збільшуючи ширину зони хімічної реакції в детонаційній хвилі і відповідно критичний діаметр заряду, змінює характер розвитку вибуху: замість різкого стрибка тиску і щодо швидкого спаду його при вибуху тонко дисперсної ВР, гранульована забезпечує при вибуху менш високий початковий тиск, але підтримує його протягом більшого проміжку часу. У результаті значно зменшується частка енергії вибуху, передана породі ударною хвилею і відповідно зростає частка енергії, використовувана у формі поршневої дії газоподібних продуктів вибуху, що приводить до більш рівномірного дроблення породи в обсязі, підданому дії вибуху.

Особливий інтерес представляють *дослідження механізму руйнування середовища вибухом, виконані А.Н. Ханукаєвим* [42]. В залежності від характеру руйнування він розрізняє три групи порід:

- відбитих від оголених поверхонь, що руйнуються під дією масиву хвиль - це породи, що володіють великою акустичною твердістю;

- породи, що руйнуються під безпосереднім впливом продуктів вибуху, що розширюються, (ґрунтові масиви);

- породи, що руйнуються як під дією прямої і відбитої хвиль, так і в результаті розширення газів (масиви міцних порід, розбиті мережею густих тріщин, неоднорідні масиви з міцних порід).

При поширенні хвилі напруг у породах першої групи руйнування відбуваються переважно в момент, коли в поверхні оголень виникають напруги, що розтягують, перевищуючи межу міцності підірваної породи. Автор відзначає, що форма і довжина вибухової хвилі визначають величину і характер руйнувань. На поверхні середовища для порід цієї групи зачатки руйнування у виді радіальних тріщин спостерігаються в момент зіткнення фронту хвилі з оголеною поверхнею, при цьому утворенні тріщини увиваються всередину масиву в міру руху відбитої хвилі до центра вибуху. При цьому хвиля невеликої амплітуди і тривалості утворить у поверхні середовища невелику лінію відколу; при більшій інтенсивності може утворитися кілька послідовних відколів. На характер руйнування, відзначає автор, впливає кількість енергії, створена хвилею в одиницю часу, що тим більше, чим більше амплітуда хвилі.

У породах другої групи руйнування починається безпосередньо в заряді, навколо якого (при сферичній його формі) утвориться порожнина у виді правильної кулі; згодом, як тільки починає позначатися вплив оголеної поверхні, порожнина витягується убік лінії найменшого опору, приймаючи форму еліпсоїда. Надалі, у той час, як обсяг верхньої частини продовжує збільшуватися, а обсяг нижньої частини досягає максимуму, виникають і розвиваються нові різновиди форм порожнини, що приводить до розриву оболонки в багатьох місцях і розкриттю порожнини.

Породи третьої групи руйнуються як від центра заряду, так і від оголених площин.

Подібної з поглядами А.Н. Ханукаева є *концепція японського вченого К. Хинр* [44]. Виконанц ним досліди дозволили зробити висновок, що міцність породи при стиску не постійна, а лінійно залежить від бічного розпору і визначається з виразу (2.4):

(2.4)

де *а* і *b* - коефіцієнти, постійні для даної породи;

- бічний розпір.

Кількість шматків, що відколюються, можна визначати з виразу (2.5)

(2.5)

де *N* - число відшарувань, утворених у породі ударною хвилею;

*Ра* – максимальний або піковий тиск ударної хвилі;

*St* - межа міцності породи на розтягнення.

Глибокий аналіз сутності руйнування гірських порід під дією вибуху можливо лише за умови достатньої вивченості питань поводження твердих тіл при найпростіших типах вибухового навантаження. Тому ми зупинимося коротко на деяких дослідженнях такого характеру.

*А.Ф. Бєляєв і М.А. Садовський* [4] *пропонують велику розмаїтість форм руйнування твердих тіл вибухом* скомпонувати в дві основні групи:

* бризантна дія – руйнування на контакті з зарядом і в безпосередній близькості від нього, що виявляється в переподрібненні середовища головною частиною імпульсу вибуху;
* фугасна дія – руйнування середовища за межами зони бризантної дії, що виявляється у формі розтріскування, зминання, зрушення за рахунок основної частини енергії вибухової хвилі.

Для основних типів промислових ВР бризантна дія характеризується меншою енергоємністю в порівнянні з фугасним.

Це обумовлено характером головної частини імпульсу і, отже, залежить від інтенсивності вибухового розкладання. Фугасна дія залежить від сповненої енергії вибуху. Знижуючи бризантну дію вибуху, можна домогтися збільшення фугасної дії. Ці роботи мали основні значення для подальшого розвитку теорії дії вибуху на середовище.

Цінними є експериментальні дослідження [14] про закон стиснення деяких твердих тіл і гірських порід при вибухових навантаженнях. Знаючи закон стиснення, можна визначити початкові параметри і закономірності поширення ударних хвиль у породах, що є важливим для вивчення процесів руйнування гірських порід вибухом. Для більшості досліджених гірських порід закон стиснення добре апроксимується залежністю (2.6):

(2.6)

де *Р* - тиск;

*А* - експериментальна константа;

і - початкова і поточна щільності.

Математичний апарат гідродинаміки й основні класичні результати досліджень радянських і закордонних учених з питань дії вибуху найбільше повно представлені в роботах К. П. Станюковича, Ф. А. Баума, Б. І. Шехтера, Я. Б. Зельдовича, А. С. Компанейця.[ ]

Л. І. Барон, А. Ф. Бєляєв, О. Е. Власов, М. В., Садовський, А. Ф. Суханов, Г. И. Покровський і А. Н. Ханукаєв створили основи теорії дії вибуху в гірських породах. Погляди цих авторів на окремі питання найчастіше не збігаються, однак, досить повно характеризують сучасний стан цієї галузі знань.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розкриття механізму руйнування гірських порід, визначення основних фізичних факторів, що обумовлюють інтенсивність дроблення гірських порід вибухом, і пошуки на цій базі нових методів керування вибухом.

Недостатні також дослідження в області вивчення процесу детонації промислових ВР і часу витікання продуктів вибуху зі свердловин і шпурів. Найчастіше дослідники розглядають поводження середовища без обліку параметрів вибухового імпульсу, у той час як вони по праву повинні бути віднесені до числа визначальних факторів процесу руйнування.

Рішення цих задач вимагає подальшого розвитку питань моделювання дії вибуху, застосування математичних методів дослідження, проведення широкого кола лабораторних і промислових досліджень, узагальнення практики і на цій базі розробки умов оптимального подрібнення гірських порід вибухом.

**2.2 Зонна модель руйнування вибухом гірських порід**

Руйнування гірського масиву при вибуху відбувається в результаті спільного впливу продуктів детонації, що розширюються, ударних хвиль і хвиль розвантаження. При цьому правильний вибір параметрів зарядів стосовно конкретних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов забезпечує швидке й економічно вигідне рішення визначеної технологічної задачі. Однак глибокі теоретичні дослідження з визначення впливу діаметра свердловинного (циліндричного) заряду, типу ВР і властивостей порід на параметри утвореної при прострілюванні порожнини і кінцеві результати вибуху вкрай обмежені і неповні.

Встановлення зазначених залежностей дозволить нам більш обґрунтовано вибирати оптимальні параметри зарядів, їхнє розташування й інтервали уповільнення при короткоуповільненому висадженні, що різко підвищить якість і ефективність такого дорогого процесу, як буровибухові роботи (БВР).

Найбільш повний облік властивостей середовища, що підривається, і характеру розвитку процесу вибуху даний у *зонній моделі В.Н. Родіонова* [29], відповідно до якої процес вибуху складається з чотирьох етапів. У прилеглій до заряду області відбувається подрібнення породи під дією сильної ударної хвилі. Оскільки в початковий момент на середовище діють дуже великі тиски вибухової хвилі, приблизно приймаєм, що *-p=σr=σφ=σz*. По зонній моделі реалізована лише задача про внутрішній вибух зосередженого заряду.

*Перший етап* - гідродинамічний, на якому гірська порода моделюється рідиною доти, поки тиск на границі продуктів детонації - ґрунт не зменшиться до величини порядку міцності часток (монокристалів) породи. Приймається, що рідина ідеально ущільнюється на фронті хвилі і не стискається за фронтом хвилі.

Рух гірської породи в близькій до порожнини області розглядається як рух рідини, що ущільнюється тільки на фронті хвилі стрибком від щільності *ρ0* до *ρ1*, а за фронтом хвилі рідина нестислива. На першому етапі частина потенційної енергії продуктів детонації переходить у кінетичну енергію гірської породи. Рух гірської породи описується наступною системою рівнянь (2.7) та (2.8):

(2.7)

(2.8)

де - координата Ейлера;

*t* - час.

Рівняння (2.7) і (2.8) виражають у диференціальній формі закони збереження відповідно кількості руху і маси.

Граничними умовами в розглянутій задачі є співвідношення на фронті ударної хвилі згідно формули (2.9):

(2.9)

і на границі розділу між продуктами детонації і середовищем відповідно (2.10):

(2.10)

де і - початкові тиск і щільність середовища;

*pн=ρВРD2/8*;

*a0* - радіус заряду;

*p2*, *ρ2* і *u2* - тиск, щільність і швидкість у продуктах детонації;

*p1*, *u1* - тиск і швидкість у гірській породі.

Припускаємо, що середовище за фронтом хвилі нестисливе, у результаті інтегрування рівняння (2.8) одержуємо де *a* и - відповідно даний радіус і швидкість розширення порожнини.

Кінетична енергія середовища в деякий момент часу *t1* визначається за формулою (2.11):

(2.11)

де - координата фронту ударної хвилі при *t=t1, R1=R(t1).*

На першому етапі вибуху робота продуктів детонації витрачається на збільшення кінетичної енергії середовища відповідно до виразу (2.12):

*Ек = Ев – ЕПД*, (2.12)

де *Ев* - енергія вибуху;

*ЕПД* - енергія продуктів детонації при *t=t1* .

На *другому етапі* відбувається подрібнення й ущільнення гірської породи під дією ударної хвилі, на фронті якої тиск перевищує межу міцності породи на роздавлювання.

На другому етапі камуфлетного вибуху циліндричного заряду гірська порода вважається твердим середовищем, на поводження якої істотно впливають і дотичні напруження. Початковими умовами є значення параметрів наприкінці першого етапу: *t = t1, a = a1,* . Передбачається, що фронт руйнування збігається з фронтом ударної хвилі. Середовище ущільнюється на постійну величину . Руйнується ГП на другому етапі стискаючими навантаженнями, тобто відбувається її роздавлювання.

Рівняння, що описують динамічне поводження ГП на другому етапі вибуху циліндричного заряду, мають вигляд (2.13, 2.14, 2.15):

(2.13)

(2.14)

(2.15)

де - відповідно радіальні і тангенціальні нормальні навантаження;

- швидкість дилатансії.

Рівняння руху (2.13) з урахуванням умови Кулона має вигляд:

(2.16)

Рішення рівняння (2.16) має вигляд

(2.17)

де - довільна функція часу;

*b=m-1/m*.

Співвідношення між радіусами порожнини і фронту хвилі

. (2.18)

Кінетична енергія середовища (для одиниці довжини заряду *l1*)

. (2.19)

Енергія стиснутих продуктів детонації визначається за формулою , де замість *a1* варто брати *a*.

Коли енергією ПД можна зневажати (*ЕПД = 0* при *t = 0*) у порівнянні з початковою кінетичною енергією середовища, то *p(a0) = 0*. Тоді з рівняння (2.19) у початковий момент часу одержимо

(2.20)

Використовуючи співвідношення (2.9), (2.18) і враховуючи, що , параметри фронту хвилі можна записати у вигляді:

(2.21)

З умови можна визначити максимальні значення радіусів порожнин (при двоетапній схемі процесу вибуху). Для першого випадку (*ЕПД = Ев*)

(2.22)

Для другого випадку (*Ек = Ев*)

(2.23)

Знаючи величину *amax*, можна з виразу визначити час розширення порожнини:

(2.24)

У випадку руйнування гірської породи під дією зрушувальної напруги на фронті ударної хвилі середовище ущільнюється на деяку постійну величину ε, фронт ударної хвилі є одночасно границею, на якій середовище переходить із пружного стану в пластичне або руйнується крихко на зсув.

Умова виникнення і реалізації пластичного плину або крихкого руйнування і поводження зруйнованої породи задаємо у вигляді умови Тріску

(2.25)

де - межа міцності породи на зрушенні.

Другий етап розвитку вибуху в гірській породі продовжується до моменту *t2*, коли фронт ударної хвилі відокремлюється від фронту руйнування і його швидкість дорівнює швидкості пружної хвилі .

Визначаємо граничне значення швидкості у момент *t2* з умови, що радіальна напруга на фронті ударної хвилі дорівнює критичному значенню міцності середовища на роздавлювання σ\*

(2.26)

Одержуємо рівняння для визначення радіуса порожнини

(2.27)

Радіус порожнини *а2* у момент *t2* для випадку визначається з виразу

(2.28)

Радіус зони подрібнення R\* для цього випадку () дорівнює

(2.29)

де - міцність монокристалічних часток.

Час *t2* визначається в результаті інтегрування рівняння (2.28):

(2.30)

де

*Третій етап* характеризується динамічним без хвильовим розширенням порожнини. З умови, що швидкість фронту руйнування стає менше швидкості фронту хвилі, визначається момент початку третього етапу. Роздроблена гірська порода рухається з внутрішнім сухим тертям. Перерозподіл енергії унаслідок хвильових процесів не враховується.

Третій етап камуфлетного вибуху циліндричного заряду починається з моменту *t2* , коли швидкість фронту руйнування стає менше пружного попередника. Зруйнована, гранульована ГП між фронтом руйнування і порожниною рухається з внутрішнім сухим тертям. При цьому виконується умова Кулона. Перед фронтом руйнування середовище вважається пружним. Передбачається, що у твердому середовищі повільно розширюється циліндрична порожнина під дією тиску газу, який утримується в ній. Розширення порожнини припиниться тоді, коли статичний напружений стан, обумовлений міцністними властивостями середовища, зможе утримати тиск продуктів вибуху.

Попередньо розглянемо розвиток руйнування крихкої гірської породи при поступовому розширенні порожнини. При малих напругах скельну ГП можна вважати пружною.

Границя зони радіальних тріщин визначається умовою при *r=* , зовнішня границя зони роздавлювання (подрібнення) характеризується умовою , де - напруга роздавлювання при одноосьовому стиску.

Усередині зони роздавлювання гірська порода буде досить сильно подрібнена і по своїх властивостях наближається до зернистого середовища типу піску з щільним упакуванням часток [25].

Відзначимо, що при камуфлетному вибуху заряду в скельних гірських породах, як показує досвід, спостерігається аналогічна картина руйнування. Це дозволяє вважати, що на заключній стадії розвитку реального вибуху, коли рух середовища і границь руйнування стають повільними, описана картина буде близька до дійсності (рисунок 2.1).

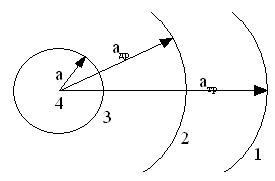


Рисунок 2.1 Схема руйнування гірської породи:

1 – зона пружних деформацій; 2 – зона радіальних тріщин;

3 – зона роздавлювання (подрібнення); 4 – порожнина.

Розглянемо пружну зону (). Рівняння рівноваги для пружного середовища по осьовій симетрії має вигляд

(2.31)

де *u* - зсув частки середовища.

Рішенням цього рівняння є вираз (2.32)

(2.32)

Постійні *с1* і *с2* визначаються з граничних умов

(2.33)

З огляду на граничні умови (2.33) і пружні співвідношення між напругами і деформаціями, одержуємо рішення рівняння (2.32) у вигляді

(2.34)

Використовуючи співвідношення (2.33), а також вираз деформацій через зсуви, можна одержати закономірності зміни напруг і деформацій з відстанню:

(2.35)

Переміщення *u0* границі пружної зони буде

(2.36)

Область зруйнованого матеріалу складається з двох зон: зовнішньої зони радіальних тріщин і внутрішньої зони роздавленого матеріалу (зона подрібнення) при граничних умовах:

(2.37)

Поводження ГП в зоні радіальних тріщин будемо характеризувати умовою , зберігаючи для радіальної напруги визначальний зв'язок Гука .

З рівняння рівноваги

(2.38)

одержуємо для зони наступні співвідношення:

(2.39)

Переміщення внутрішньої границі зони радіальних тріщин під дією напруги , можна визначити в такий спосіб:

(2.40)

З огляду на граничні умови (2.37) і рівняння (2.39), знайдемо зв'язок між у вигляді

(2.41)

Знайдемо зв'язок між радіусами зони подрібнення і порожнини *a*:

(2.42)

Для випадку формула (2.42) спрощується до вигляду

(2.43)

Тиск у порожнині *p* тим ближче до максимального *pmax* , чим суворіше виконується нерівність , де

(2.44)

Важливо відзначити, що *pmax* фактично є характеристикою середовища і визначається тільки стискальністю і міцністю на роздавлювання , при чому .

Одержуємо вираз для тиску в порожнині

(2.45)

Для граничного випадку одержуємо максимальний тиск у порожнині

(2.46)

На *четвертому етапі* відбувається тільки поширення пружних хвиль, що випромінюються зовнішньою границею зони руйнування.

Отже, у результаті вирішення задачі визначаються: закономірність зміни квадрата швидкості розширення границі порожнини від її радіуса; максимальний радіус порожнини; час розширення порожнини; радіус зони подрібнення; радіус зони утворення тріщин. Отримані розрахункові формули дозволяють науково обґрунтовано розраховувати параметри вибуху свердловинних зарядів у гірській породі [37].

На підставі викладеного можна сформулювати основні висновки. Розроблено методику аналітичного розрахунку дії вибуху свердловинного заряду в ГП, що дозволяє розрахувати вплив параметрів заряду на параметри порожнини, зони подрібнення і утворення тріщин, утворених при прострілюванні з урахуванням властивостей середовища і ВР, час утворення порожнини в залежності від властивостей середовища і параметрів заряду.

**2.3 Дія вибуху одиночного заряду в середовищі**

У практиці ведення підривних робіт одиночні заряди застосовують рідко. Однак при вивченні вибуху будь-якої системи зарядів необхідно більш докладно досліджувати дію вибуху одиночного заряду на середовище [14].

Якісну картину поводження гірського масиву при вибуху в ньому одиночного заряду можна представити в такий спосіб. Після детонації заряду в зарядній камері стрибкоподібно підвищується тиск до декількох десятків і навіть сотень тисяч атмосфер. Величина цього тиску може бути обчислена за формулою Абеля:

(2.47)

де – число молів газоподібних продуктів, що утворяться при вибуху одного кілограма вибухової речовини;

*R* – газова постійна;

*Т* – абсолютна температура продуктів вибуху;

– коволюм;

- щільність заряджання.

Продукти вибуху, діючи на стінки зарядної камери, утворюють у масиві складне поле навантажень, що поширюються зі швидкістю, обумовленою механічними властивостями середовища [7].

Для дослідження процесу поширення поля напружень плоску прозору модель з оптично активного матеріалу поміщаємо в промінь поляризованого світла. Процес руйнування матеріалу дією в ньому поля напружень, викликаного ударом газоподібних продуктів вибуху об стінки зарядної камери, вивчався при перебуванні моделі в промені звичайного, неполяризованого світла.

Якщо розкласти поле напружень, що виникає в плоскій моделі, на головні напруги, то виявляється, що в результаті тиску газоподібних продуктів вибуху в масиві в радіальному напрямку виникають великі стискаючі напруження, а в тангенціальному – розтягуючі. Тому, що тверді тіла добре пручаються стискові і легко руйнуються при розтяганні, у розглянутому шарі можуть відбутися радіальні руйнування, викликані дією напружень, що розтягують. При вибуху в пластині виникають радіальні тріщини, що складають основну масу руйнувань.

При досягненні полем напружень вільної поверхні починається процес зсуву часток убік оголення, або утворення відбитого поля напружень. Коли розтягуючи напруження у відбитому полі перевищать межу міцності матеріалу на розтягання, у поверхні оголення відбудуться руйнування, не зв'язані з руйнуваннями, що поширюються від заряду.

Вкажемо ще на один можливий вид руйнувань. Коли тиск продуктів вибуху зменшиться і перестане розсовувати стінки порожнини, середовище за рахунок придбаного запасу пружної енергії почне повертатися у вихідне положення, причому процес повернення буде поширюватися від заряду всередину масиву. При цьому в масиві навколо заряду можуть виникнути концентричні тріщини.

Такий механізм руйнування буде мати місце тільки в однорідному крихкому середовищі в напрямку від заряду до вільної площини. Убік масиву системи тріщин будуть розвиватися значно менше. Відповідно до теорії максимальних деформацій для крихких тіл руйнування наступить у тому випадку, коли відносна деформація перевищить припустиму для даного виду матеріалів.

Для руйнування тіла досить, щоб задовольнялася умова

(2.48)

де – відносна деформація матеріалу від дії вибухового навантаження;

- найбільша можлива відносна деформація для даного матеріалу.

Відносна деформація тіла визначається за формулою

(2.49)

де – абсолютне переміщення стінок шпуру в заданий момент часу t;

– довжина масиву, напруженого дією вибухового навантаження в напрямку від заряду убік переміщення у прийнятий момент t,

(2.50)

*с* – швидкість поширення напруг у масиві.

Якщо спрямовано по лінії найменшого опору убік вільної поверхні, то S = W = const. У цьому випадку відносні деформації зростають, оскільки збільшується чисельник у рівнянні (2.49).

Зовсім інша картина руйнування буде мати місце при поширенні поля напружень убік масиву. У цьому випадку у рівнянні (2.49) чисельник росте повільно, а знаменник дуже швидко. Цим положенням і доводиться той факт, що в напрямок лінії найменшого опору руйнування почнуться раніш і будуть розвиватися більш інтенсивно.

Поряд з вище сказаним у руйнуванні ГП вибухом значне місце займає поршнева дія газоподібних продуктів вибуху (ПВ). При дослідженні механізму руйнування ГП дією вибуху установлено, що при проходженні хвилі напружень у середовищі виникає безліч тріщин, подальший розвиток яких продовжується за рахунок поршневої дії газів доти, доки не закінчиться їхнє витікання з зарядної порожнини [35]. Дотепер не встановлені ні частка енергії вибуху, що йде на поршневу дію, ні частка обсягу руйнування, обумовлена ним. Значення поршневої дії ВР може бути приблизно оцінене на основі експериментальних даних, отриманих при підводному вибуху. Енергія ударної хвилі у воді, що аналогічна енергії ударної хвилі у твердому тілі, і енергія, що викликає процес пульсації газового міхура, що аналогічний процесові спучування і зсуву середовища при підривних роботах, складають у сумі велику частину енергії вибуху. Ці два види роботи є основними при вибуху в породі. Параметри зазначених видів енергії, отримані експериментально [32, 3], характеризують механізм передачі енергії вибуху навколишньому середовищу. Аналіз цих робіт показує, що на поршневу дію вибуху витрачається до 50 % енергії ВР, тоді як тільки 15 % її переходить в ударну хвилю, або хвилю напруги.

Проведені експериментальні дослідження якісної картини процесу руйнування і зрушення моделі під дією вибуху автором [14] дозволяють припустити, що газоподібні продукти детонації заряду не тільки роблять розпушення і зрушення подрібненої маси, але і безпосередньо беруть участь у процесі тріщиноутворення.

**Висновки по розділу**

1. Розглянуто моделі руйнування гірського масиву при вибуху і визначено, що вони мають певні недоліки, а саме громіздкість розрахунків, розгляд масиву із нехтуванням межових ефектів, не врахуванням важливих властивостей порід, таких як стисливість.

2. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що гірські породи руйнуються згідно зонної моделі.

3. Дія ударної хвилі навколо зарядної порожнини призводить до утворення хвилі напружень, яка поширюючись по монолітній гірській породі, утворює три системи тріщин.