

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ І РОЗВИТКУ ПИЛОГАЗОВОЇ ХМАРИ В АТМОСФЕРІ ПРИ МАСОВИХ ВИБУХАХ У КАР'ЄРАХ

У роботі наведені результати досліджень параметрів формування і розвитку пилогазової хмари в атмосфері при масових вибухах у кар'єрах.

В работе приведены результаты исследований параметров формирования и развития пылегазового облака в атмосфере при массовых взрывах в карьерах.

The paper presents the results of research and development settings for creating dust and gas clouds in the atmosphere at a mass explosion in quarries.

Вступ. При інтенсифікації відкритих гірничих робіт, як найбільш економічного і ефективного способу видобутку корисних копалин, у теперішній час і в майбутньому слід очікувати збільшення глибини кар'єрів України до 450-500 м. Буровибуховий спосіб видобутку корисних копалин залишається поки єдиним ефективним способом руйнування гірських порід незважаючи на його пагубний вплив на довкілля. Масові вибухи при проведенні відкритих гірничих робіт є основним джерелом забруднення довкілля дрібнодисперсним пилом, пиловим аерозолем та токсичними газовими продуктами вибуху (СО, NO, NO₂ та ін.), які під дією вітру розповсюджуються на відстань до 20 км від території кар'єру. Забруднення повітря при вибухових роботах завдає шкоди не тільки здоров'ю людини, величезна шкода заподіюється сільськогосподарським культурам, лісам, будівлям, підприємствам і пам'ятникам культури. Потенційна небезпека пилу визначається його високою дисперсністю та вмістом вільного двоокису кремнію [1].

Процес дії вибуху при руйнуванні гірничих порід має вельми складний характер. Відомо, що при вибуху заряду вибухової речовини (ВР) в свердловині розпечені газоподібні продукти вибуху миттєво створюють величезний тиск і наносять сильний удар по стінках свердловини. Прямі ударні хвилі з великою швидкістю поширюються у вибуховому середовищі. При своєму розповсюдженні ударні хвилі розширюють природні і утворюють нові тріщини в масиві, створюють поле напруги, яке виконує первинне руйнування гірничих порід. У шарі контакту гірничих порід і вибухової речовини контактуюча порода піддається усесторонньому стискуванню, переходить в пластичний стан і дуже передрібнюється. При досягненні вільної поверхні уступу прямі ударні хвилі не згасають, їх енергія перетворюється в енергію відбитих ударних хвиль. Під дією відбитої ударної хвилі, яка спрямована до центру заряду ВР, виникає поле зворотних деформацій і напруги, яке піддає масив усебічному розтягуванню і додатковому дробленню. Гірничий масив в зоні дії продуктів вибуху залучається ними в рух, що супроводжується додатковим дробленням шматків породи, їх інтенсивним тертям між собою та виділенням великої кількості пилу. Таким чином можна відмітити, що фізична суть процесу

руйнування гірських порід вибухом вивчена досить добре як в теоретичному, так і в практичному плані [2, 3, 4].

У той же час процес зародження і формування пилогазової хмари (ПГХ) при масових вибухах в кар'єрах представляє нині ще маловивчений процес.

Загальну картину процесу можна представити за наведеними в науковій літературі розрізненими даними, що стосуються процесу формування ПГХ при вибуху свердловинних зарядів або їх фізичних моделей. Наприклад, початкова швидкість прориву газів через тріщини досягає 600-700 м/с [3], швидкість вильоту забивки зі свердловини 120-150 м/с, а продуктів вибуху - до 800 м/с [2]. Швидкість поширення ПГХ в початковий момент вибуху за даними к.т.н. А.П. Ткаченко досягає 200 м/с і більше. За даними проф. П.В. Бересневіча час формування ПГХ становить 30-60 с, при цьому газу і пил викидаються на висоту до 250 м, концентрація пилу в хмарі становить 680-4250 мг/м³, а загальний обсяг ПГХ досягає 10-20 млн.м³, час дії динамічного фактора вибуху становить 1 секунду, час дії температурного чинника дорівнює 1 хвилині. Деякі автори розглядають пилогазову хмару як окремих об'єкт, виділяючи первинне, вторинне і третинне ПГХ, при цьому швидкість викиду продуктів вибуху з гирла свердловини становить за даними цих авторів 400-700 м/с [5]. За даними інших авторів при вибуху свердловин без забивки 60-65% газів вилітає зі швидкістю 250-350 м/с, при використанні стандартної забивки 10-15% газів вилітає зі швидкістю 150-200 м/с [6].

Таким чином, експериментальні дані про фізичні процеси зародження та формування ПГХ досить суперечливі і не дозволяють оцінити динаміку розвитку ПГХ в часі. Тому дослідження параметрів формування і розвитку пилогазової хмари в атмосфері при масових вибухах у кар'єрах є актуальною науково-практичною задачею, яка відноситься до переліку пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 року (п. 4 «Раціональне природокористування», Закон України від 12.10.2010 р. № 2519-VI) та збігається з переліком пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року за напрямом «Технології очищення та запобігання забрудненню атмосферного повітря», що затверджені Постановою КМУ від 07.09. 2011 р. № 942.

Метою роботи є дослідження параметрів формування і розвитку пилогазової хмари в атмосфері при масових вибухах у кар'єрах.

Викладення матеріалів та результати досліджень. Як відомо, спроби теоретичного опису процесів, що відбуваються в зоні зародження і формування ПГХ особливого успіху не мали через відсутність достатнього об'єму експериментальних даних про фізичні процеси, що протікають в зоні вибуху, та відсутність наукових приладів для прямого дослідження або зондування епіцентру ПГХ, особливо в період його зародження та формування.

На основі запропонованого нами підходу [7], було розглянуто математичну модель розвитку в атмосфері ПГХ при вибухових роботах у кар'єрі, що включає ряд часткових задач гідродинамічного характеру: визначення геометричних, кінетичних та динамічних характеристик ПГХ (розміри, швидкість підйому та розширення; концентрація в ПГХ продуктів вибуху та пилу різної дисперсності); час та

ареал осадження різних пилових фракцій; газопиловий стан у кар'єрі та у навколишньому середовищі (НС), а також цілий ряд інших гідродинамічних задач взаємодії ПГХ з НС. З урахуванням фізики процесу, гідродинамічна задача щодо виникнення та розвитку ПГХ може бути розділена на три стадії.

Перша - початкова стадія. Під час якої в атмосферу надходять сипучі речовини забивки та частково продукти вибуху ВР, що фільтруються крізь шпаристе тіло забивки.

Друга - стадія зародження та формування ПГХ. Вона настає після розлому гірничого масиву та характеризується інтенсивним виходом у атмосферу газоподібних продуктів вибуху (ПВ) та пилу по всій межі роздробленого масиву. Продовжується ця стадія до моменту вирівнювання внутрішнього тиску у роздробленому масиві з атмосферним. Під час другої стадії виникає найбільш інтенсивний розвиток ПГХ за рахунок його підживлення з епіцентру вибуху.

Третя - стадія розвитку ПГХ. Являє собою етап самостійної еволюції ПГХ у атмосфері кар'єру та взаємодією з навколишнім середовищем після підживлення газами з епіцентру вибуху.

Перша та друга з перерахованих трьох стадій являє собою складні та маловивчені процеси, які можна розглядати як самостійні гідрогазодинамічні задачі, що визначаються різноманітними фізико-технічними параметрами, які взаємопов'язані між собою. При цьому перевагу було віддано таким спрощеним моделям, котрі для свого функціонування не потребують виконання дуже детальної вихідної інформації та зводяться або до систем звичайних диференціальних рівнянь, або припускають аналітичне рішення.

Матеріалами для забивки зазвичай слугують різноманітні сипучі матеріали та їх суміші (пісок, глина, щебінок та інші), тому рух тіла забивки необхідно розглядати на основі тих механічних моделей, котрі використовуються для сипучих матеріалів та ґрунтів. Однією з найбільш простих та адекватних для цього явища є математична модель так званого «пластичного газу», що розроблена Рахматуліним Х.А., Сагомояном Я.А. та ін. Ця модель заснована на емпіричному факті, що для таких матеріалів при стискуванні між гідростатичним тиском P :

$$P = - I / 3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (1)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні компоненти напруження;
та об'ємною деформацією ζ :

$$\zeta = I - \rho_a / \rho, \quad (2)$$

існує деяка функціональна залежність:

$$P = f(\zeta). \quad (3)$$

Таким чином, можна вважати, що процес розширення продуктів вибуху ВР у свердловині заряду в період з моменту детонації до моменту розлому масиву з високим ступенем точності є адіабатичним.

Результати натурних досліджень та обробка отриманих кінограм фотокінозйомки ПГХ показали, що в момент зародження хмара в основному має форму сферичного сегменту, котрий характеризується двома параметрами: висотою та радіусом основи. Після періоду зародження ПГХ у вигляді сферичної «шапки», починається період формування ПГХ у вигляді турбулентного стру-

меню, котрий на основній ділянці має вигляд зрізаного конуса. Таким чином можна вважати, що за стадією зародження ПГХ у вигляді сферичного сегменту виникає стадія, коли ПГХ отримує вигляд зрізаного конуса зі сферичним сегментом. Розглянемо умови переходу від однієї форми до іншої за допомогою схеми на рисунку 1.

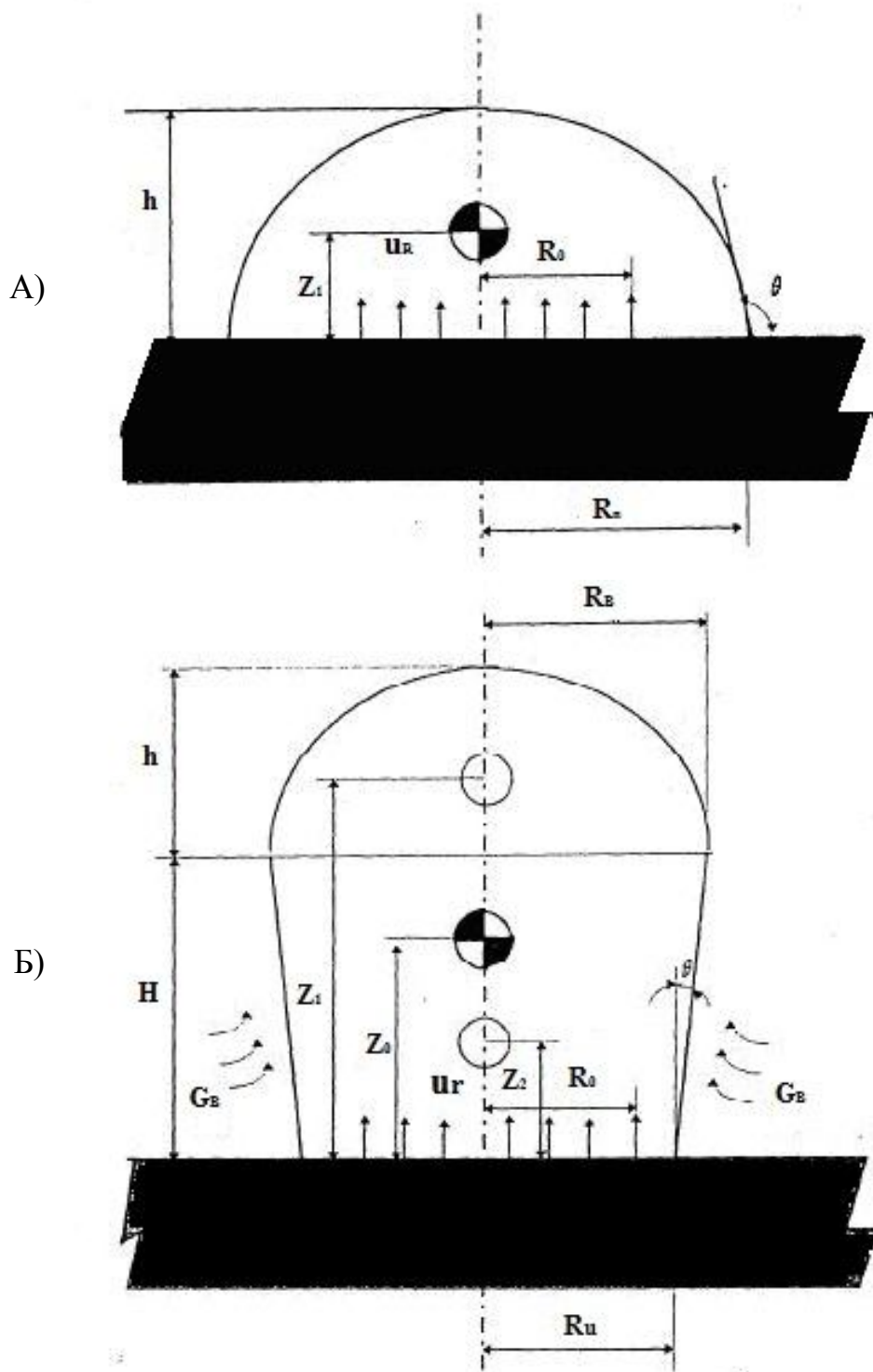


Рис. 1. Схема формування ПГХ при підживленні її продуктами вибуху з роздробленого масиву: А) у формі сферичного сегменту; Б) у формі усіченого конуса з сферичним сегментом

Введемо наступні позначення: R_0 – середній радіус площі вибухового блоку (для спрощення площа вибухового блоку розглядається як коло радіусом R_0); $R_H(t)$ – радіус нижньої основи ПГХ; R_B – радіус верхньої основи зрізаного конуса (максимальний радіус хмари); H – висота зрізаного конуса; h – висота сферичного сегменту, Z_1 та Z_2 – відповідно, висота центру тяжіння сферичного сегменту і усіченого конуса над рівнем основи хмари, u_R та u_T – відповідно, середня швидкість підйому ПГХ (приймається рівною швидкості руху його центру мас) і середня швидкість руху газів з роздробленого масиву.

На етапі зародження об'єм ПГХ:

$$V_{ПГХ} = V_1 = \pi h / 6 (h^2 + 3 R_B^2). \quad (4)$$

На етапі формування струменю:

$$V_{ПГХ} = V_1 + V_2 \quad (5)$$

де: $V_1 = \pi h / 6 (h^2 + 3 R_B^2)$,

$$V_2 = \pi h / 6 (R_B^2 + R_B R_H + R_H^2),$$

при цьому $R_B = R_H + H\alpha$, де $\alpha = \tan\theta$ та θ – кут напіврозчину конічної частини хмари. За експериментальними даними з класичної гідрогазодинаміки для стаціонарних струменів на початковій ділянці $\alpha = 0,22$, на основній ділянці $\alpha = 0,27$.

Таким чином, на першій стадії об'єм ПГХ, згідно (4), є функцією двох параметрів h та R_H :

$$V_{ПГХ} = V_1 = f(R_H, h) \quad (6)$$

Так само, вважаючи, що на другій стадії сферичний сегмент плавно спрягається з конічною частиною, загальний об'єм ПГХ

$$V_{ПГХ} = V_1 + V_2 \quad (7)$$

можна розглядати як функцію двох параметрів, наприклад, R_H та H ,

$$V_{ПГХ} = f(R_H, H).$$

Таким чином, відповідно (6) та (7), об'єм ПГХ у прийнятій моделі залежить від двох незалежних параметрів: R_H та h або R_H та H .

З урахуванням вищевикладеного запропоновано метод розрахунку процесу розвитку ПГХ в атмосфері кар'єру при масовому вибуху, що складається з трьох блоків:

- перший блок: розрахунок газодинамічної обстановки у роздробленому масиві в момент початку виходу ПВ в атмосферу;

- другий блок: розрахунок ПГХ на етапі її зародження (коли ПГХ має форму сферичного сегменту);

- третій блок: розрахунок ПГХ на етапі її формування (коли ПГХ має форму зрізаного конуса з сферичною верхньою частиною).

При цьому, для розрахунків параметрів ПГХ, необхідно знати: дані технологічного плану (площа підривного блоку, число свердловин, глибина свердловин та ін.), а також характеристики ВР, що використовується (теплота вибухового перетворення, щільність та ін.). Серед цих параметрів фігурує коефіцієнт розпушеного гірничого масиву вибухом m_P (емпірична величина) та коефіцієнт детонації μ , що враховує можливу неповноту детонації ВР у свердловині, у результаті чого

відбувається викид частини ВР у атмосферу з наступним його догоранням у ПГХ. Склад продуктів вибуху ВР для типу ВР, що використовується, вважається заданим. Для розрахунку необхідно також вказати середні значення теплоємностей c_p та c_v продуктів вибуху (у діапазоні температур $300\text{ K} < T < 1000\text{ K}$).

Після визначення вихідних даних за допомогою першого блоку можна розрахувати значення тиску, температури та щільності продуктів вибуху в момент розлому масиву і початку виходу ПВ в атмосферу.

У другому блоку розрахунку (етап зародження ПГХ) математична модель приводилась до стандартної системи розрахунку диференціальних рівнянь виду:

$$\frac{dP_1}{dt} = F_1, \quad \frac{dV_{\text{ПГХ}}}{dt} = F_2, \quad \frac{dZ_0}{dt} = F_3, \quad \frac{dK}{dt} = F_4, \quad \frac{dM_{\Gamma}}{dt} = F_5, \quad (8)$$

де: P_1 – поточний тиск на дні роздробленого масиву; $V_{\text{ПГХ}}$ – об'єм ПГХ; Z_0 – висота центру тяжіння хмари; K – кількість руху газів у ПГХ; M_{Γ} – маса ПВ, що надходять у ПГХ. Ежекція атмосферного повітря в ПГХ на першому етапі розрахунку не враховується. Початкові дані для першого етапу: $P_1 = P_p$, $V_{\text{ПГХ}} = 0$, $K = 0$, $Z_0 = 0$, $M_{\Gamma} = 0$.

У процесі розрахунку також передбачений розрахунок усього комплексу необхідних параметрів ПГХ в залежності від часу: об'єм та маса ПГХ; висота центра тяжіння, загальна висота та радіус нижньої основи ПГХ; середня температура, щільність та загальна кількість руху в ПГХ, також деякі інші величини. При цьому висота хмари та радіус її нижньої основи визначається безпосередньо через об'єм V та положення центру маси хмари Z_0 .

У третьому блоці розрахунку (етап формування ПГХ у вигляді зрізаного конусу у нижній частині та сферичного сегменту у верхній), до системи попередніх рівнянь (8) додається рівняння (9) ежекції повітря в ПГХ у вигляді:

$$\frac{dM_B}{dt} = F_{\sigma}. \quad (9)$$

Крім цього, для стандартизації розрахунку, рівняння з визначення висоти конічної H та сферичної h частин ПГХ записуються також у вигляді диференціальних рівнянь:

$$\frac{dH}{dt} = F_7, \quad \frac{dh}{dt} = F_8. \quad (10)$$

Початковими даними для цього розрахунку слугують дані, що були у кінці другого блоку розрахунку, а для знов введених величин (маси повітря, що ежектується M_B та висоти H конічної частини ПГХ) – значення: $M_B = 0$, $H = 0$.

Розрахунок параметрів формування ПГХ продовжується до моменту закінчення її підживлення з роздробленого масиву, що настає при вирівнюванні тиску всередині масиву з атмосферним тиском.

Процес забруднення атмосфери при вибухових роботах у кар'єрах та вибір напрямів захисту довкілля пов'язаний з механізмом зародження та формування ПГХ, насамперед з тріщинуватістю масиву порід, їх фізико-механічними властивостями та структурою масиву підривного блоку в цілому.

Дослідження структури масиву підривного блоку в кар'єрі були проведені шляхом аналізу кернів свердловин, пробурених на Першотравневому кар'єрі

фахівцями Криворізької геологорозвідувальної експедиції. Результати досліджень вказують, що верхня 5-метрова зона уступу практично знаходиться в зруйнованому стані і взяти проби керн неможливо. На глибині 5-10 метрів породи мають помітну тріщинуватість і не мають цілісної структури. На глибині 10-30 м спостерігається характерна для порід Першотравневого кар'єру природна тріщинуватість і структура гірничого масиву. Таким чином результати досліджень показали, що верхній 5-метровий шар підривного блоку знаходиться в розпушеному стані, являє собою зону перебура свердловин попереднього горизонту та є джерелом додаткового пилоутворення, пов'язаного з інтенсивним виносом вибуховими газами передрібнених частинок пилу верхнього розпушеного шару порід. Встановлена структура масиву порід підривного блоку (уступу) в кар'єрі дозволяє оцінити його вплив на процес зароджування ПГХ при масовому вибуху.

Можна стверджувати, що з урахуванням 3-х видів виявленої тріщинуватості та стану гірничих порід підривного блоку, існують 3 різні зони уступу, які по різному беруть участь у процесі зародження та формування ПГХ. По відношенню до процесу пилоутворення при масовому вибуху запропоновано розрізнити такі три характерні зони:

I зона - зона перебура та розпушеного масиву, розміром до 5 м є одним з основних активних джерел пилоутворення при вибуху;

II зона - зона основного масиву з підвищеною тріщинуватістю, знаходиться на глибині від 5 до 10 м і в процесі пилоутворення менш активна;

III зона - зона вибуху заряду ВР, знаходиться на глибині від 10 до 20 м і є основною зоною передрібнення порід і активного пилоутворення.

Таким чином істотний вплив на пилоутворення при вибухах в кар'єрі має природна і штучна тріщинуватість масиву, наявність і розміри зони перебура на підривному уступі. На рисунку 2 наведено загальний вигляд підривного блоку із зазначенням характерних зон тріщинуватості і пилоутворення при масовому вибуху на уступі кар'єру.

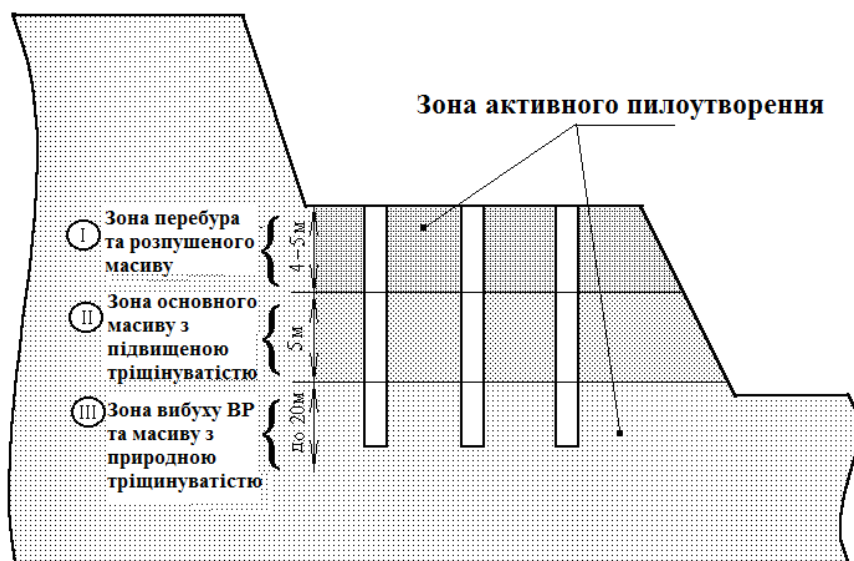


Рис. 2. Основні зони пилоутворення при масовому вибуху в кар'єрі

Висновки:

1. Доведено, що процеси руйнування гірських порід вибухом вивчені досить добре як в теоретичному, так і в практичному плані. У той же час процес зародження і формування пилогазової хмари при масових вибухах в кар'єрах представляє нині ще маловивчений процес. Показано, що пилогазова хмара при масових вибухах на кар'єрах це об'єкт з високою початковою температурою, швидкістю та висотою підйому, який при поширенні в атмосфері має пагубний вплив на довкілля.

2. Розглянуто математичну модель розвитку в атмосфері пилогазової хмари при вибухових роботах у кар'єрі, що включає ряд часткових задач гідрогазодинамічного характеру з визначення геометричних, кінетичних та динамічних характеристик ПГХ.

3. За результатами експериментальних досліджень показано, що в момент зародження ПГХ має форму сферичного сегменту, котрий характеризується висотою та радіусом основи, а у період формування ПГХ отримує вигляд турбулентного струменю, котрий на основній ділянці має вигляд зрізаного конуса зі сферичним сегментом.

4. Запропоновано метод розрахунку параметрів формування і розвитку пилогазової хмари в атмосфері при масовому вибуху у кар'єрах, що складається з трьох блоків:

- розрахунок газодинамічної обстановки у роздробленому масиві в момент початку виходу ПВ в атмосферу;

- розрахунок ПГХ на етапі її зародження (коли ПГХ має форму сферичного сегменту);

- розрахунок ПГХ на етапі її формування (коли ПГХ має форму зрізаного конуса з сферичною верхньою частиною).

5. Встановлено, що при масовому вибуху в кар'єрі створюється 3 характерні зони пилоутворення, які пов'язані з природної і штучної тріщинуватістю масиву, наявністю і розміром зони перебура на підривному уступі.

Список літератури

1. Зберовский А.В. Охрана атмосферы в экосистеме «карьер-окружающая среда-человек».- Дн-вск: РИО АП ДКТ, 1997. – 136 с.
2. Кутузов Б.Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород. - М.: Недра, 1973. - 312 с.
3. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах / М.М. Комир, Л.М. Гейман, В.С. Кравцов и др. - М.: Недра, 1972. - 214 с.
4. Действие взрыва в грунтах и горных породах. Материалы Всесоюзн. НТК. - К.: Наукова думка, 1982. - 283с.
5. Способы снижения пылегазовыделений при массовых взрывах на карьерах / Джос В.Ф., Сытенков В.Н., Сладков Н.П. и др. // *Металлург. и горноруд. промышл.*- 1995.- №1. С. 56-57.
6. Ефремов Э.И., Петренко В.Д. Экология массовых взрывов в карьерах // *Металлург. и горноруд. промышл.* - 1991. - №4. С. 5-6.
7. Математическая модель развития пылегазового облака в окружающей среде при взрыве в карьере / Зберовский А.В., Гоман О.Г., В.В.Дубей и др. // В кн.: *Экологические проблемы промышленного региона. Тез. докл. МНТК, Макеевка, 1995 г., с. 9-10.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Собко Б.Ю.
Надійшла до редакції 15.04.2014*