

Using the results of research and the use of modern technical means of collective protection can reduce the dust content in the work area of shearers.

**Key words:** coal mine, dust, pneumoconiosis, risk value, specific dust extraction, purification combine, dusts, miner's health, health protection.

УДК 622.807:504.06

© А.А. Юрченко, Д.В. Кулікова

## ФОРМУВАННЯ ТА РОСПОВСЮДЖЕННЯ ПИЛОВОЇ ХМАРИ ПІСЛЯ МАСОВОГО ВИБУХУ В ЗАЛІЗОРУДНОМУ КАР'ЄРІ

© A. Yurchenko, D. Kulikova

## THE FORMATION AND SPREAD OF DUST CLOUD AFTER A MASSIVE EXPLOSION AT AN IRON-ORE QUARRY

**Мета.** Розроблення методики визначення параметрів підйому та розповсюдження пилу в пило-газовій хмарі при масовому вибуху в залізорудному кар'єрі, а також оцінки забруднення пилом прилеглих територій.

**Методика дослідження.** Для вирішення поставлених задач у роботі використані: аналітичний метод – для дослідження фізичних процесів утворення пило-газової хмари при масовому вибуху; методи математичного моделювання – для визначення параметрів розповсюдження різних фракцій пилу в кар'єрному просторі та за його межами.

**Результати дослідження.** Уточнено та систематизовано чинники, що впливають на процес формування пило-газової хмари, яка утворюється після масового вибуху. Розроблено метод визначення висоти підйому фракцій пилу на всіх етапах формування та розповсюдження пилової хмари, а також визначено параметри забруднення пилом прилеглих до кар'єру територій.

**Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток теоретичні моделі розподілу пилових частинок за висотою пило-газової хмари при масовому вибуху, що дозволило уточнити фракційну структуру пилової хмари і підвищити достовірність розрахунку розсіювання пилу вітром за межами кар'єру. Висота підйому пилових частинок під дією теплового фактора при відсутності вітру в приземному шарі атмосфери нелінійно залежить від їх розмірів, щільності речовини, параметрів свердловинних зарядів, типу вибухової речовини і температури атмосферного повітря.

**Практичне значення.** Отримані результати дозволяють прогнозувати висоту підйому пилової хмари по закінченню процесу її формування. Розрахунки показали, що при масовому вибуху потужністю 500 т вибухової речовини типу україніту при температурі атмосферного повітря 293 °К верхня межа пилової хмари досягає 600 м. Встановлена дальність і площа розсіювання хмари залізорудної пилу в цілому, а також, зокрема, тонко- і грубодисперсної її фракцій при середньорічній швидкості вітру в Кривбасі 5 м/с. Показано, що при масовому вибуху потужністю 500 т і глибині кар'єру 300 м з кутом укосу навітряного борту 30° дальність розсіювання грубодисперсного залізорудного пилу з розмірами частинок від 73 мкм до 13 мкм становить від 0,14 км до 4,4 км, тонкодисперсного пилу з діаметрами частинок від 7

мкм до 1 мкм – відповідно від 40 км до 739,6 км. При цьому валові викиди пилу (питомі викиди) склали 1,302 кг/км<sup>2</sup>, а грубодисперсного пилу – 7775,7 кг/км<sup>2</sup>. Площа розсіювання тонкодисперсного пилу з діаметром частинок 1 мкм склала 28770,4 км<sup>2</sup>.

**Ключові слова:** залізорудний кар'єр, масовий вибух, пило-газова хмара, фракції пилу, висота підйому, дальність та площа розсіювання.

**Вступ.** Забруднення навколишнього середовища в значній мірі пов'язано з діяльністю підприємств гірничодобувної галузі, зокрема, з інтенсифікацією видобутку залізної руди. Так, тільки гірничо-збагачувальними комбінатами, які знаходяться в межах міста Кривого Рогу та його околиць, щорічно викидається в атмосферу до 59,5 тис. т. пилу з 65,1 тис. т. загального обсягу по місту. При цьому викиди в атмосферу пилу і шкідливих газів досягли такого рівня, що місто і прилеглі території оголошені зоною екологічного лиха [1].

Видобуток залізної руди ведеться переважно відкритим способом, що вимагає проведення масових вибухів в кар'єрах, які супроводжуються викидом в атмосферу пилу і шкідливих газів у вигляді пило-газової хмари (ПГХ), вносячи істотний внесок в зниження екологічної безпеки регіону.

В результаті досліджень запиленості повітря на кордоні санітарно-захисної зони (СЗЗ) від кар'єрів Кривбасу встановлено, що в ряді випадків запиленість повітря перевищував показник ГДК в 17-200 разів. Встановлено також, що, наприклад, для умов кар'єрів ВАТ «Інгулецький ГЗК» концентрація пилу в хмарі після вибуху становить від 1320 до 1400 мг/м<sup>3</sup>. Результати досліджень дисперсного складу пилу в 20 м від блоку, де ведуться вибухові роботи, без застосування засобів пригнічення пилу приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Дисперсний склад пилових частинок, що утворюються після масових вибухів в кар'єрах ВАТ «ІнГЗК» без засобів пригнічення пилу

Показник дисперсного складу	Фракції пилу, мкм						
	<1,4	1,4-4,2	4,2-10	10-15	15-30	30-45	45-100
Діаметр пилових частинок, мкм							
Зміст пилових частинок %	10,67	11,24	12,46	14,15	15,88	17,37	18,24

Таким чином, можна зробити важливий висновок про те, що пило-газова хмара містить значну кількість (до 35%) тонкодисперсного (респірабельного) пилу з розмірами частинок 1,4-10 мкм. Ця фракція рухається за лініями струму повітря, тому розсіюється в атмосфері значно далше інших, повільніше осідає, а її частка в осілому пилу зростає з віддаленням від вибухового блоку. Через деякий час зміст тонкого пилу в пиловій хмарі досягає 100%, оскільки великі частинки досить швидко осідають в атмосфері.

В частинках пило-газової хмари підвищений вміст важких металів, яке в міліграмах на кілограм сухої речовини має наступні значення: залізо – 15000; цинк – 259; марганець – 800; хром – 37; кобальт – 63; нікель – 25; мідь – 67; кадмій – 14; свинець – 35.

Пил, що осів, забруднює ґрунт і водойми. Так, дослідження забруднення ґрунтів на території Криворізького басейну [2, 3, 4] виявили в них високий вміст важких металів, в тому числі: заліза (в 9 разів вище фону), нікелю (в 5 разів вище фону), кадмію (в 5 разів вище фону) та ін.

В результаті, мешканці промислових регіонів, які складають більше 40% всього населення, систематично піддаються впливу цих шкідливих речовин в малих концентраціях [5]. Небезпека забруднення середовища для людини (так само як для тварин і рослин) ускладнюється тим, що організми мають здатність акумулювати згадані вище хімічні елементи і з'єднання. Так, їх накопичення в організмі людини знижує опірність до інфекцій, призводить до розвитку серцево-судинних і онкологічних захворювань, до астми, цирозу печінки та ін.

**Постановка задачі.** Екологічна небезпека масових вибухів в кар'єрах визначається, в першу чергу, рівнем приземних концентрацій забруднюючих речовин, включаючи пил, за межами санітарно-захисної зони цих кар'єрів. Причому концентрації, а також дальність розсіювання забруднювачів, залежать від параметрів масового вибуху, висоти підйому пилогазового хмари і умов природного провітрювання кар'єрів. Тому для підвищення екологічної безпеки масових вибухів при вирішенні задач пригнічення пилу важливо виявити взаємний зв'язок між зазначеними факторами. Для цього необхідні подальші дослідження процесу викиду забруднюючих речовин в атмосферу при масових вибухах, їх виносу в навколишнє середовище і впливу на екологічну безпеку прилеглих територій.

**Аналіз попередніх досліджень.** Дослідження процесу формування ПГХ при масових вибухах, результати яких наведені в роботах [2, 6, 7], показали, що спочатку в атмосферу викидаються продукти детонації з певною початковою швидкістю руху, що залежить від динамічного фактора вибуху. В подальшому швидкість підйому хмари знижується, а процес його подальшого розвитку йде за рахунок теплового фактора (за рахунок конвекції, оскільки, температура ПГХ перевищує температуру навколишнього середовища). При цьому час дії динамічного фактора обчислюється до однієї секунди, а температурного – хвилинами.

Вивчення процесу формування пило-газової хмари проводилося з урахуванням припущення про незалежність динамічного і теплового факторів, що впливають на цей процес, так як теплові втрати в період дії динамічного фактора незначні.

Процес виникнення і розвитку ПГХ при масовому вибуху можна розділити на три етапи [8]:

Перший етап тривалістю до 180 мс з моменту початку процесу детонації, під час якого в атмосферу надходять сипучі речовини набійки, які виштовхуються з свердловин високим тиском, і частково продукти детонації вибухівки, що фільтруються через пористий матеріал набійки.

Другий етап зародження і формування ПГХ тривалістю з 180 мс до 800 мс, що настає після розлому гірського масиву і характеризується інтенсивним виходом в атмосферу газоподібних продуктів детонації і вибуху, а також пилу по

всьому кордоні роздробленого масиву. Триває цей етап до моменту вирівнювання внутрішнього тиску в розпушеному масиві з атмосферним тиском. У цей час відбувається найбільш інтенсивний розвиток ПГХ за рахунок його підживлення з вогнища вибуху.

Третій етап тривалістю від 800 мс до 30с характеризується початком самостійної теплової еволюції хмари вибуху, його гальмування і розсіювання в атмосфері.

На рис. 1 схематично представлений процес формування ПГО при масовому вибуху в кар'єрі.

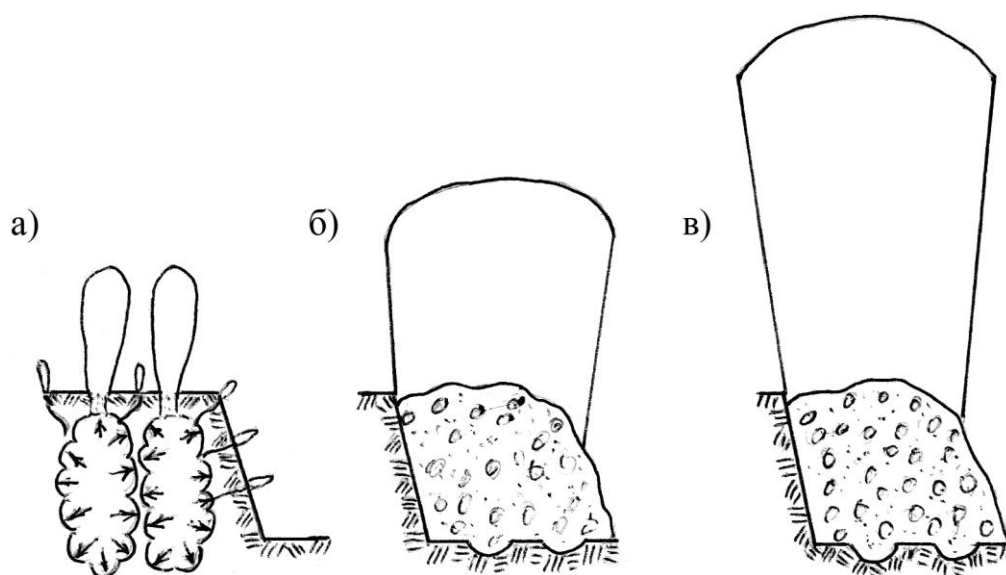


Рис. 1. Схеми процесу формування пило-газової хмари при масовому вибуху в кар'єрі: а, б, в – відповідно через 180, 800, 30000 мс

Важливішими параметрами, що впливають на забруднення пилом приземного прошарку атмосфери та прилеглих територій, окрім метеорологічних умов, є обсяги викинутого пилу та висота його підйому під дією теплових чинників. Відомі на цей час математичні моделі дозволяють визначити загальну висоту підйому пило-газової хмари без урахування дисперсності пилових частинок.

При вирішенні проблем пригнічення пило-газової хмари після масових вибухів в кар'єрах необхідна інформація, окрім дисперсного складу пилової хмари, про висоту підйому хмари в цілому, розподіл фракцій пилу по її висоті, дальність розповсюдження пилу під дією вітру, обсяги забруднення пилом прилеглих територій.

**Основна частина.** Результати досліджень загальної висоти підйому ПГХ і дальності її поширення мають суперечливий характер. Так, в роботах [2, 6, 7] стверджується, що ПГХ при масовому вибуху досягає висоти до 1,6 км і поширюється на відстані 8-12 км і більше В роботі [8] показано, що великі фракції пилу інтенсивно випадають з пило-газової хмари через 60-120 с після вибуху, а гази і дрібні частинки пилу в залежності від швидкості вітру поширюються на

різні відстані від його епіцентру (до 2-3 км и більше). В роботі [9] встановлено, що під дією теплового фактора ПГХ отримує в середньому 50% збільшення висоти свого підйому, а час дії фактора досягає декількох хвилин. Дослідженнями встановлено, що за перші  $t_I=800$  мс під дією енергії вибуху ПГХ викидається на висоту  $h_I=100-120$ м. При цьому швидкість руху всіх компонентів хмари складає  $u_I=h_I/t_I=125-150$  м/с. Причому період формування епіцентрів не залежить від метеорологічних параметрів атмосфери. Беручи до уваги наведені дані, важливо визначитися з висотою підйому ПГХ на третьому етапі її розвитку. Тому проаналізуємо процес її створення:

З другого закону Ньютона випливає, що елементарне зміна кількості руху дорівнює елементарному імпульсу сили [10]. В результаті цього частка пилу під дією сил інерції після викиду її зі свердловини продуктами детонації ВР рухається вгору, володіючи кількістю руху  $m\vartheta$ , де  $m$  – маса частинки кг,  $\vartheta$  – швидкість її руху, м/с. Перешкоджає руху частинки сила тяжіння  $F_T=mg$  і сила опору повітря  $F_c=0,5\rho_B\xi\vartheta^2S_M$ , де  $\rho_B$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  – коефіцієнт опору, який залежить від числа Рейнольдса;  $\vartheta$  – швидкість руху пилових частинок, м/с;  $S_M$  – площа миделевого (поперечного) перетину частки, м<sup>2</sup>. Таким чином,

$$d(m\vartheta) = Fdt,$$

$$\frac{d(m\vartheta)}{dt} = F_T + F_c.$$

Підставимо в останній вираз значення діючих на частку сил:

$$m\frac{d\vartheta}{dt} = mg + 0,5\rho_B\xi\vartheta^2S_M, \text{ звідки}$$

$$\vartheta = \left( \frac{m(a-g)}{0,5\rho_B\xi S_M} \right)^{0,5}.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що на другому етапі формування пило-газової хмари частинки з більшою масою будуть мати максимальну швидкість, піднімуться на більшу висоту і їх рух під дією динамічного фактора закінчиться, коли прискорення їх руху зрівняється з прискоренням земного тяжіння.

Проведені теоретичні дослідження для найпростішого випадку формування пилової хмари за нормальних метеорологічних умов та при відсутності вітру, а також при ізотермічній стратифікації атмосфери, дозволили одержати аналітичний вираз для розрахунку висоти підйому пилової частинки в залежності від початкових температур пило-газової хмари та атмосферного повітря, розмірів частинки та густини її речовини, параметрів вибухівки та свердловинних зарядів у вигляді:

$$h = \frac{M\vartheta_D}{2\tau} \left[ \frac{1}{0,33 + (l_3/l_{BB})(\rho_3/\rho_{BB})} \right]^{1/2} + g, \quad (1)$$

$$\frac{3g}{2\rho_4 d_4} \frac{293P_a}{1,013 \cdot 10^5} \left( \frac{\rho_a}{T_2} - \frac{\rho_0}{T_1} \right)$$

де  $h$  – висота підйому пилової частки під дією температурних чинників, м;  $M=5,3 \cdot 10^3$  – коефіцієнт, що враховує взаємодію пилової частки зі стінками свердловини;  $g_d$  – швидкість детонації вибухівки в заряді, м/с;  $\tau = \frac{\rho_q d_q}{18\mu}$  – час релаксації пилової частки при внесенні її в потік газу, с;  $\rho_q$  – густина речовини пилової частки, кг/м<sup>3</sup>;  $d_q$  – діаметр пилової частки, м;  $\mu = 18,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с – динамічна в'язкість повітря;  $l_3$  – довжина набійки свердловинного заряду, м;  $l_{BB}$  – довжина вибухівки свердловинного заряду, м;  $\rho_3$  – густина речовини набійки, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – густина вибухівки, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $P_a$  – атмосферний тиск, Па;  $T_1$  – температура газової суміші продуктів детонації, К;  $T_2$  – температура атмосферного повітря, К;  $\rho_a$  – густина атмосферного повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – густина продуктів детонації, кг/м<sup>3</sup>.

Розрахунки розподілу пилових частинок в хмарі здійснювались для масового вибуху «Україніту–ПП-1» потужністю 500 т. При формуванні пилової хмари під дією теплового чинника тонкодисперсний пил, що розповсюджений по всьому об'єму початкової полідисперсної хмари, піднімається на найбільшу висоту. Пилі частинки більшого розміру піднімаються на меншу висоту і т. д. Таким чином, полідисперсний пил в хмарі розподіляється за висотою (при незмінній густині речовини). Від висоти підйому частинок кожного розміру залежатимуть: характер розсіювання хмари в атмосфері під впливом вітру та дифузії, приземні концентрації пилу, інтенсивність його осідання на ґрунт і, в кінцевому разі, екологічна небезпека масових вибухів в кар'єрі. В табл. 2 наведені результати розрахунку з виразу (1) висоти підйому умовних хмар з середнім діаметром досліджуваних фракцій пилу при відсутності вітру під дією теплового чинника.

Важливим параметром, який значним чином впливає на розсіювання винесеної із кар'єра повітряними струменями пилової хмари, є її висота при виході із кар'єра відносно земної поверхні  $h_3$  (рис. 2).

Таблиця 2

Граничні висоти підйому умовних пилових хмар з частинками різного діаметру

Межі підйому	Середній діаметр фракції, мкм						
	1	3	7	13	23	38	73
Верхня, м	603,8	281,3	189,1	157,2	41,0	132,7	126,6
Нижня, м	483,8	161,3	69,1	37,2	21,0	12,7	6,6

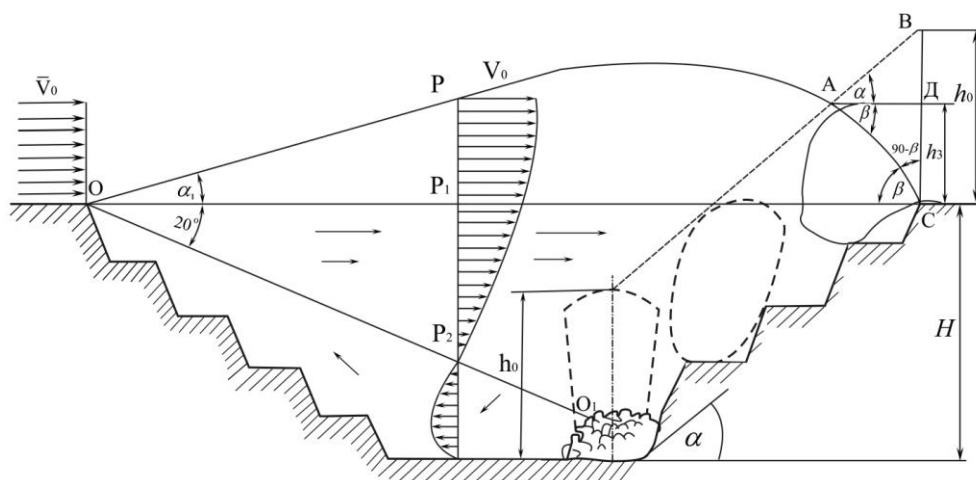


Рис. 2. Схема руху пилової хмари в кар'єрі під дією вітру

Цю висоту можна визначити з одержаної залежності:

$$h_3 = \frac{h_0}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta)},$$

де  $h_0$  – висота первинної пилової хмари відносно дна кар'єру, м;  $\alpha$  – кут нахилу навітряного борту кар'єру, град;  $\beta$  – кут між межею вільного струменю та площиною земної поверхні, град.

Після виносу пилових частинок із кар'єру вони під дією гравітаційних сил осідають на земну поверхню. Час осідання частинок залежить від густини їх речовини та розмірів, а також від метеорологічних умов. При осіданні частинки пилу відносяться вітром і дальність їх розсіювання певною мірою залежить від його швидкості. При цьому грубодисперсний пил швидко осідає і вітром відносяться на порівняно малу відстань, а дрібнодисперсний пил з малою швидкістю осідання виносить на велику відстань.

В табл. 3 наведені результати розрахунків параметрів розсіювання хмари залізородного пилу під дією вітру для масового вибуху потужністю 500 т при нормальних метеорологічних умовах при ізотермічній стратифікації атмосфери, а також при сталій швидкості вітру – 5 м/с. Тут параметри розсіювання наступні:  $\vartheta_{jc}$  – швидкість осідання частинок пилу, м/с;  $t_{oc}$  – час осідання частинок пилу з верхньої межі хмари, с;  $L_p$  – відстань виносу частинок пилу, км.

Розрахунки розсіювання частинок залізородної пилу показали, що тонкодисперсна фракція (до 10 мкм) практично розсіюється в атмосфері, так як несесться вітром на великі відстані від декількох десятків кілометрів до кількох сотень кілометрів. Грубодисперсна фракція (від 10 до 100 мкм) розсіюється на відстані від декількох сотень метрів до кількох кілометрів.

Таблиця 3

Результати розрахунків розсіювання хмари залізородного пилу після масового вибуху

Показники	Діаметр пилових частинок, мкм						
	1	3	7	13	23	38	73
$g_{oc}, м/с$	$0,012 \cdot 10^{-2}$	$0,108 \cdot 10^{-2}$	$0,587 \cdot 10^{-2}$	$2,02 \cdot 10^{-2}$	$6,33 \cdot 10^{-2}$	$17,28 \cdot 10^{-2}$	$63,79 \cdot 10^{-2}$
$t_{oc}, с$	591666,7	65740,7	12095,4	3514,9	1121,6	410,9	111,3
$L_p, км$	739,6	82,5	15,1	4,4	1,4	0,5	0,14

Таким чином, при досліджуваному масовому вибуху на прилеглий до кар'єру земної поверхні на відстані від 0 до 140 м осядуть грубодисперсні і тонкодисперсні фракції пилу з малих висот хмари. На кордоні цього факела осяде пил з максимальним діаметром 73 мкм, яка витала на верхній межі хмари. На відстані 1,4 км від кар'єра проходить межа зони, де повністю з усього хмари осяде пил із діаметром частинок в 23 мкм. У цій же зоні осяде і пил дрібніших фракцій з проміжних висот пилової хмари. На відстані 4,4 км проходить кордон осадження фракції 13 мкм і так далі.

Для визначення щільності викидів залізородної рили в  $т/км^2$  необхідно визначити площу її розсіювання. І тому необхідно встановити ширину площі осадження пилу при її розсіюванні. Максимальна ширина цієї площі спостерігається в тому випадку, коли напрямок вітру є фронтальним до вибухового блоку. У цьому випадку ширина пилової хмари на виході з кар'єру дорівнює довжині вибухового блоку.

Довжина вибухового блоку може бути визначена із виразу:

$$B_0 = \frac{A}{qhb},$$

де  $B_0$  – довжина вибухового блоку, м;  $A$  – потужність масового вибуху, кг;  $q$  – питома витрата ВР,  $кг/м^3$ ;  $h$  – глибина підриваємих свердловин, м;  $b$  – ширина підривається блоку, м (в нашому прикладі довжина заряду вибухового блоку дорівнює 1900 м). При подальшому русі хмара внаслідок турбулентної дифузії розширюється в поперечному напрямку вітру. Інтенсивність пульсацій в рухомий атмосфері становить 3-5% [11]. Таким чином, розширення зони розповсюдження пилу при її розсіюванні становить  $(0,03-0,05) L$  в обидві боки, де  $L$  – відстань до виходу хмари з кар'єру, м.

Таким чином, за цими даними можна розрахувати площу розсіювання пилової хмари під дією бічного вітру:

$$S = \left( \frac{B_0 + B_p}{2} \right) L_p = \left( B_0 + 0,05 U_0 \frac{h_3}{g_{oc}} \right) k \frac{U_0 h_3}{g_{oc}},$$

де  $B_0$  – ширина пилової хмари при в момент його виносу з кар'єру, м, яка дорівнює довжині вибухового блоку при фронтальному напрямку вітру;  $h_3$  – висота пилової хмари відносно земної поверхні в момент його виносу з кар'єру, м;



$U_0$  – швидкість вітру, м/с;  $g_{oc}$  – швидкість осадження пилових частинок, м/с;  $B_p = B_0 + 2 \cdot 0,05 \cdot k \cdot U_0 t$  ширина площі розсіювання пилової хмари на відстані  $L_p$  від кар'єру, м;  $L_p$  – відстань розсіювання пилової хмари, м,  $k$  – коефіцієнт нерівномірності швидкості вітру протягом доби.

Розрахунки площі розсіювання пилової хмари показали, що при прийнятих умовах всі фракції пилу осідають на площі в 28770,4 км<sup>2</sup>. Площа розсіювання грубодисперсного пилу з діаметром частинок більше 13 мкм складає близько 9,2 км<sup>2</sup>. При цьому кількість осілого пилу (валовий викид) в середньому складає 3,8 кг/км<sup>2</sup>, а для дрібнодисперсного – 1,3 кг/км<sup>2</sup>.

Коефіцієнт екологічного ризику  $HQ$  за рівнем дії валового викиду пилу при масових вибухах в кар'єрах на здоров'я людини суттєво більше 1, а ймовірність розвитку шкідливих ефектів зростає пропорційно збільшенню  $HQ$ . Шкідливий вплив пилу на довкілля, включаючи ґрунт та відкриті водоймища, визначається значними площами його розсіювання за межами санітарно-захисних зон кар'єрів [12, 13]. Це підтверджує необхідність удосконалення способів та заходів зниження викидів пилу та їх пригнічення [14, 15]. Причому, основним критерієм ефективності засобів та заходів, що пропонуються в частині вказаного екологічного ризику, є зниження інтенсивності виносу пилу вітровими потоками за межі кар'єра.

**Висновки.** В результаті теоретичних досліджень параметрів пило-газової хмари при масових вибухах у залізорудних кар'єрах, що визначають його екологічну небезпеку, зроблені наступні висновки:

Висота підйому пилових частинок під дією теплового фактора при відсутності вітру в приземному шарі атмосфери залежить від їх розмірів, щільності речовини, параметрів свердловинних зарядів, типу вибухової речовини і температури атмосферного повітря. Отримана відповідна аналітична залежність від цих чинників має нелінійний характер і дозволяє прогнозувати висоту підйому пилової хмари по закінченню процесу його формування. Розрахунки показали, що при масовому вибуху потужністю 500 т вибухової речовини типу україніту при температурі атмосферного повітря 293 °К верхня межа пилової хмари досягає 600 м.

Дальність і площа розсіювання пилових частинок, винесених з кар'єрного простору вітровими потоками, залежить від висоти хмари при його виході з кар'єрного простору, швидкості вітру, геометричних параметрів кар'єра, їх розмірів і щільності речовини. Отримані нелінійні аналітичні залежності дозволили встановити фракційний склад залізорудної пилу, що виноситься з кар'єрного простору вітровими потоками при природному провітрюванні кар'єра, а також висоту пилової хмари над землею поверхнею при його винесенні з кар'єра. Для умов Кривбасу при швидкості вітру 5 м/с максимальний діаметр частинок залізорудного пилу, що виноситься з кар'єру, становить 73 мкм, дальність розсіювання тонкодисперсного залізорудного пилу при цьому становить 739 км, грубодисперсного – 4,4 км. При цьому площа розсіювання тонкодисперсного пилу становить понад 28 тис. км<sup>2</sup>, а грубодисперсного – 9,2 км<sup>2</sup>, а коефіцієнт еколо-

гічного ризику за пиловим чинником на межі санітарно захисної зони перевищує в 36 разів допустиме санітарними нормами значення і ступінь екологічної небезпеки є «дуже небезпечним».

#### Перелік посилань

1. Дриженко, А.Ю. (2014). *Відкриті гірничі роботи*. Дніпропетровськ: НГУ, 590 с.
2. Зберовский А.В.(1997) Охрана атмосферы в экосистеме « карьер - окружающая среда - человек ». Днепропетровск: РИО АП ДКТ, 136 с.
3. Тыщук В.Ю. (2006) *Исследование водных растворов “Еком” для пылеподавления при массовых взрывах в карьерах*. Збірник наукових праць НГУ, (25), 181-188.
4. Долгова Т.И. (2004) *Комплексная оценка состояния почв горнодобывающих регионов и прогноз последствий их техногенной трансформации*. Дисс. докт. техн. наук, Днепропетровск: ГВУЗ НГУ, 364 с.
5. Матвеев Л.Т.(1076) *Курс общей метеорологии. Физика атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат, 639 с.
6. Ефремов Э.И., Бересневич П. В., Петренко В. Д. (1996) *Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах*. Днепропетровск : СІЧ, 178 с.
7. Бересневич П.В., Михайлов В. А., Филатов С. С. (1990) *Аэрология карьеров. Справочник* М.: Недра, 280 с.
8. Ушаков К.З., Михайлов В.А. (1985) *Аэрология карьеров*. М.: Недра, 272 с.
9. Бересневич П.В., Фурса И.В. (1981) *Исследования влияния теплового фактора на формирование пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах*. Всесоюзная научно – техническая конференция “ Проблемы горной теплофизики”. Тезисы выступлений. Л.: РТП ЛГИ, 80-81.
10. Абрамович Г.Н. *Теория турбулентных струй*. М.: ГИФМЛ, 715 с.
11. Медников Е.П. (1981) *Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей*. М.: Наука, 174 с.
12. Колесник В.Е., Павличенко, А.В., Бучавий, Ю.В. (2018). Уніфікована методика комплексного оцінювання рівня екологічної небезпеки промислових об'єктів та ефективності впровадження природоохоронних технологій. Техногенно-екологічна безпека, 3. 64-69. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1182847>
13. Колесник В. С., Павличенко, А. В., Холоденко, Т. Ф. (2018). Комплексне оцінювання рівня екологічної небезпеки технологій буропідричних робіт із застосуванням емульсійних вибухових речовин в кар'єрах. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 55. 360-370. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu\\_2018\\_55\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2018_55_38).
14. Kholodenko, T., Ustimenko, Ye., Pidkamenna, L., Pavlychenko, A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and surface mining, *New Developments in Mining Engineering: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, CRC Press/Balkema, Netherlands, 211–219.
15. Kholodenko, T., Ustimenko, Ye., Pidkamenna, L., Pavlychenko A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. The Netherlands : CRC Press / Balkema, 255-260

#### ABSTRACT

**Purpose.** Methods development the for rise and diffusion parameters determining of dust in a dust-gas cloud during a massive explosion in an iron ore quarry, as well as an assessment of contamination by dust in adjacent territories.

**The methods.** To solve the problems posed there are next methods ware used: an analytical method – to study the physical processes of formation of a dust-gas cloud during a massive explosion, methods of mathematical modeling – to determine the parameters of the distribution of various

fractions of dust in the quarry and outside it.

**Findings.** The factors affecting the formation of dust and gas clouds, which is formed after a massive explosion were identified and systematized. The method for determining the height of dust fractions at all stages of the formation and propagation of a dust cloud, as well as determining the parameters of dust pollution in areas adjacent to the quarry were developed.

**The originality.** Theoretical models of the distribution of dust particles along the height of a dust-gas cloud during a mass explosion were further developed, which made it possible to refine the fractional structure of the dust cloud and increase the reliability of the calculation of dust dispersion by the wind outside the quarry. The height of the rise of dust particles under the action of the thermal factor in the absence of wind in the surface layer of the atmosphere non-linearly depends on their size, density of the substance, parameters of borehole charges, type of explosive and temperature of atmospheric air.

**Practical implications.** The obtained results allow predict the height of the rise of the dust cloud at the end of its formation. The calculations showed that with a mass explosion with a capacity of 500 tons of Ukrainite type explosive at an atmospheric air temperature of 293 K, the upper limit of the dust cloud rise to 600 m. The range and dispersion area of the cloud of iron ore dust in general, as well as, in particular, thin and coarse dust fractions with an average annual wind speed in Krivbas 5 m/s were calculated. There are illustrated that the mass explosion with a capacity of 500 tons and a pit depth of 300 m with a 30° windward side slope angle, the dispersion distance of coarse iron dust with particle sizes from 73 m to 13 m ranges from 0.14 km to 4.4 km, tone – dispersed dust with a particle diameter from 7 microns to 1 microns – respectively from 40 km to 739.6 km. At the same time, gross dust emissions (specific emissions) amounted to 1.302 kg/km<sup>2</sup>, and coarse dust – 7775.7 kg/km<sup>2</sup>. The area of dispersion of fine dust with a particle diameter of 1 micron was 28,770.4 km<sup>2</sup>.

**Keywords:** *iron ore quarry, mass explosion, dust-gas cloud, dust fractions, height of rise, range and area of diffusion.*

## АННОТАЦІЯ

**Цель.** Разработка методики определения параметров подъема и распространения пыли в пыле-газовом облаке при массовом взрыве в железорудном карьере, а также оценки загрязнения пылью прилегающих территорий.

**Методика исследований.** Для решения поставленных задач в работе использованы: аналитический метод - для исследования физических процессов образования пыле-газового облака при массовом взрыве; методы математического моделирования - для определения параметров распространения различных фракций пыли в карьерном пространстве и за его пределами.

**Результаты исследований.** Определены и систематизированы факторы, влияющие на процесс формирования пылегазового облака, которое образуется после массивного взрыва. Разработан метод определения высоты пылевых фракций на всех этапах формирования и распространения пылевого облака, а также определения параметров пылевого загрязнения на участках, прилегающих к карьере.

**Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие теоретические модели распределения пылевых частиц по высоте пыле-газового облака при массовом взрыве, что позволило уточнить фракционную структуру пылевого облака и повысить достоверность расчета рассеива-

ния пыли ветром за пределами карьера. Высота подъема пылевых частиц под действием теплового фактора при отсутствии ветра в приземном слое атмосферы нелинейно зависит от их размеров, плотности вещества, параметров скважинных зарядов, типа взрывчатого вещества и температуры атмосферного воздуха.

**Практическое значение.** Полученные результаты позволяют прогнозировать высоту подъема пылевого облака по окончании процесса его формирования. Расчёты показали, что при массовом взрыве мощностью 500 т взрывчатого вещества типа украинита при температуре атмосферного воздуха 293 °К верхняя граница пылевого облака достигает 600 м. Установлена дальность и площадь рассеивания облака железорудной пыли в целом, а также, в частности, тонко- и грубодисперсной ее фракций при среднегодовой скорости ветра в Кривбасе 5 м/с. Показано, что при массовом взрыве мощностью 500 т и глубине карьера 300 м с углом откоса наветренного борта 30° дальность рассеивания грубодисперсной железорудной пыли с размерами частиц от 73 мкм до 13 мкм составляет от 0,14 км до 4,4 км, тонкодисперсной пыли с диаметром частиц от 7 мкм до 1 мкм - соответственно от 40 км до 739,6 км. При этом валовые выбросы пыли (удельные выбросы) составили 1,302 кг/км<sup>2</sup>, а грубодисперсной пыли – 7775,7 кг/км<sup>2</sup>. Площадь рассеивания тонкодисперсной пыли с диаметром частиц 1 мкм составила 28770,4 км<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** *железорудный карьер, массовый взрыв, пыле-газовое облако, фракции пыли, высота подъема, дальность и площадь распространения*