

О.Я. Тверда, к.т.н., ст. викл.

В.Д. Воробйов, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України „КПІ”

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РОЗМІРІВ І ГЕОМЕТРІЇ МЕРЕЖІ СВЕРДЛОВИН ЗА ФАКТОРОМ ПРОПРАЦЮВАННЯ ПІДОШВИ УСТУПУ ДЛЯ ТРІЩИНУВАТИХ СКЕЛЬНИХ ПОРІД

Запропоновано відстані між зарядами в ряду і між рядами визначати за ступенем пропрацювання підосви уступу з урахуванням тріщинуватості гірської породи, конфігурації і розмірів воронки дроблення. Величини областей, утворених дією вибуху чотирьох свердловинних зарядів, використано як критерії оцінки ступеню пропрацювання підосви уступу. Встановлено залежності відносної величини пропрацьованої одним зарядом площі та відносної величини недопрацьованої площі при вибуху чотирьох зарядів за прямокутною та шаховою мережею у тріщинуватих породах від коефіцієнтів перекриття радіусів воронок дроблення по вертикалі і горизонталі. Визначено відстані і мережу розташування свердловин, за якої ефективність використання площі руйнування максимальна. Отримані залежності можуть бути використані для вибору та розрахунку розмірів мережі свердловинних зарядів при проектуванні буропідричних робіт на кар'єрах скельних тріщинуватих гірських порід з метою підвищення ефективності пропрацювання підосви уступу.

Ключові слова: воронка дроблення; гірська маса; площа руйнування; підосва уступу; радіус; відстані між зарядами; мережа свердловин.

Актуальність роботи. При проведенні підричних робіт (ПР) на кар'єрах скельних порід з метою одержання гірської маси високої якості виникає низка труднощів. Після вибуху часто спостерігається високий вихід негабаритних фракцій, «пороги» по підосві уступу, а також переподрібнення гірської маси. Все це зумовлює додаткові трудозатрати і втрати корисної копалини. Досягнення необхідного дроблення гірської маси з мінімальним вмістом некондиційних фракцій і якісним пропрацюванням підосви уступу при ПР на кар'єрі залежить, в першу чергу, від правильного вибору геометричних параметрів розташування свердловинних зарядів [1].

Відомо достатньо аналітичних і емпіричних формул для розрахунку відстаней між зарядами [2–9]. Здебільшого вони базуються на припущеннях про раціональну величину перекриття воронок дроблення і не мають достатнього наукового обґрунтування. При цьому мається на увазі, що воронка дроблення має еліпсоподібний контур. Такі розрахунки є суб'єктивними, оскільки залежної від тріщинуватості гірської породи воронка дроблення може набувати й іншої форми. Отже, обґрунтування впливу відстані між зарядами при різних схемах їх розташування з урахуванням тріщинуватості і анізотропії гірських порід на якість пропрацювання підосви уступу є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – визначення відстаней між зарядами за ступенем пропрацювання підосви уступу тріщинуватих скельних порід при вибухах на кар'єрах.

Матеріал і результати досліджень. При проведенні ПР на уступах тріщинуватих скельних порід утворюються воронки дроблення хрестоподібної форми, що аналогічні астроїду. При розташуванні зарядів як по прямокутній, так і шаховій мережі, з хрестоподібною конфігурацією воронки дроблення між чотирма сусідніми зарядами А, В, С, D (рис. 1) утворюється чотири види областей руйнування масиву: перша – недопрацьована і утворена між контурами воронок від вибуху чотирьох зарядів; друга – утворена внаслідок накладення воронок від двох сусідніх зарядів по великому і малому радіусах зони руйнування; третя – пропрацьована дією вибуху чотирьох зарядів без 1, 2 і 4 областей руйнування; четверта – утворена внаслідок накладення воронок від трьох сусідніх зарядів по великому і малому радіусах зони руйнування (рис. 1).

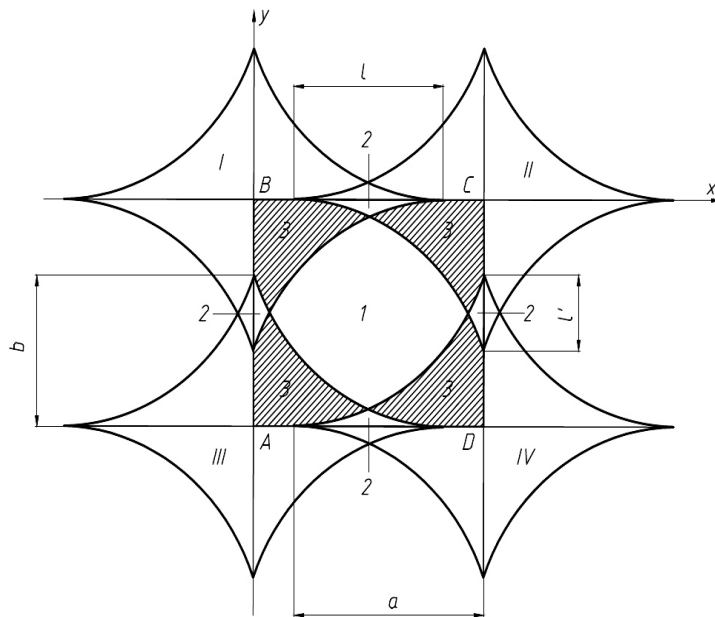


Рис. 1. Схема до розрахунку величин пропрацьованої одним зарядом і недопрацьованої площі при вибуху з розташуванням зарядів за прямокутною мережею: a, b – радіус, відповідно, великої і малої осей воронки дроблення; l, l' – величини перекриття воронки дроблення, відповідно, по горизонталі і вертикалі; I, II, III, IV – порядкові номери зон дроблення; 1–3 – області, що утворені від дії вибуху чотирьох зарядів

Величини цих областей, а отже, якість гірської маси і витрати на її досягнення безпосередньо залежать від відстаней між зарядами в ряду a_3 і між рядами b_3 . Тому при їх визначенні, окрім анізотропії масиву, необхідно враховувати відносну величину пропрацьованої одним зарядом площі V_n^n і недопрацьованої площі руйнування V_n^n .

Пропрацьованими і недопрацьованими областями є фігури, що утворені при перекритті воронки дроблення. Розрахунок їх площ можна виконати, виходячи з рівнянь астроида.

Відносна величина недопрацьованої площі V_n^n розраховується як відношення її абсолютної величини до площі між зарядами S_{ABCD} :

$$V_n^n = \frac{S_n^n}{S_{ABCD}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Абсолютна величина недопрацьованої площі:

$$S_n^n = \left[(2 \cdot a - l) \cdot (2 \cdot b - l') - 4 \cdot \int_0^a \frac{(a^{\frac{2}{3}} - x^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}}{K_a} dx + 4 \cdot \int_{a-\frac{l}{2}}^a \frac{(a^{\frac{2}{3}} - x^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}}{K_a} dx + 4 \cdot \int_{b-\frac{l'}{2}}^b (a^{\frac{2}{3}} - (K_a^{\frac{2}{3}} y^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}} dy \right],$$

де K_a – коефіцієнт анізотропії.

Площа між зарядами

$$S_{ABCD} = (2 \cdot a - l) \cdot (2 \cdot b - l'), \quad (2)$$

де $l = k_l \cdot a$; $l' = k_{l'} \cdot a$ ($k_l, k_{l'}$ – коефіцієнти перекриття, відповідно, по горизонталі і вертикалі).

Відносна величина пропрацьованої одним зарядом площі руйнування гірської породи показує, яка її частина використовується раціонально, і визначається з урахуванням (2) за формулою:

$$V_n^n = \frac{S_n^n}{S_{ABCD}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Абсолютна величина пропрацьованої одним зарядом площі:

$$S_n^n = 4 \cdot \left[\int_0^a \frac{(a^{\frac{2}{3}} - x^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}}{K_a} dx - \frac{4 \cdot \int_{a-\frac{l}{2}}^a \frac{(a^{\frac{2}{3}} - x^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}}{K_a} dx}{2} - \frac{\int_{b-\frac{l'}{2}}^b (a^{\frac{2}{3}} - (K_a^{\frac{2}{3}} y^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}) dy}{2} \right].$$

Розрахунок V_n^n та V_n^n проводився для горизонтального (рис. 2, а) і вертикального перекриттів (рис. 2, б) при $a = 3,5$ м, $K_a = 1,4$. Як видно з рисунку 2, а, найбільша величина V_n^n спостерігається при $k_l = 1$, при цьому $V_n^n = 50$ %, при $k_l = 1,5$ – $V_n^n = 20$ %. При зміні k_l від 0 до 1,2 пропрацьована одним зарядом площа руйнування змінюється від 42 % до 0, максимальне її значення спостерігається при $k_l = 1$, при цьому $V_n^n = 50$ % (рис. 2, б).

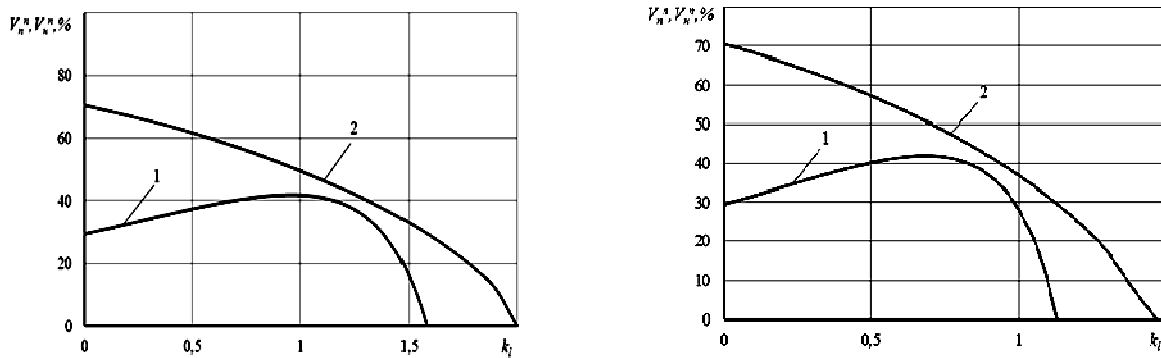


Рис. 2. Залежність зміни: а – V_n^n (1) і V_n^n (2) від k_l ; б – V_n^u (1) та V_n^u (2) від k_l

При використанні шахової мережі (рис. 3) недопрацьована область в масиві більш розосереджена, порівняно з прямокутною (рис. 3, а) і розраховується за формулою:

$$S_n^u = \left[2 \cdot \int_{N_1}^{N_2} \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx - \int_{N_1}^{N_2} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{m}{2}) dx.$$

Підставляючи (4) в (1), можна розрахувати відносну величину недопрацьованої області для шахової мережі V_n^u . Відносна величина пропрацьованої одним зарядом площі V_n^u , в даному випадку, визначається за (3), використовуючи як абсолютну її величину такий вираз:

$$S_n^u = S_{ABCD} - [S_n^u + S_2],$$

де S_{ABCD} знаходиться за (2); S_n^u – за (4); $S_2 = 4 \cdot S_{N_3 N_4 N_5 O} + 4 \cdot S_{N_1 N_3 N_4}$, якщо $l' = 0$, $l \geq 0$, $S_{N_1 N_2} \geq 0$ (рис. 3, а); $S_2 = S_2' = 2 \cdot S_{N_6 N_7 N_8 N_9} + 2 \cdot S_{N_6 N_7 N_{10} CO} + 2 \cdot S_{N_6 N_{12} N_{13} BO}$, якщо $l' = 0$, $l \geq 0$, $S_{N_1 N_2} \leq 0$ (рис. 3, б); $S_2 = S_2'' = 2 \cdot S_{N_1 N_{15} N_{16}}$, якщо $l = 0$, $l' \geq 0$, $S_{N_1 N_2} \geq 0$ (рис. 3, в); $S_2 = S_2''' = 2 \cdot S_{N_{15} N_{16} N_{17} N_{18}}$, якщо $l = 0$, $l' \geq 0$, $S_{N_1 N_2} \leq 0$ (рис. 3, г);

$$S_{N_3 N_4 N_5 O} = \int_0^{N_2} \left[1 - \left(\frac{x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b dx.$$

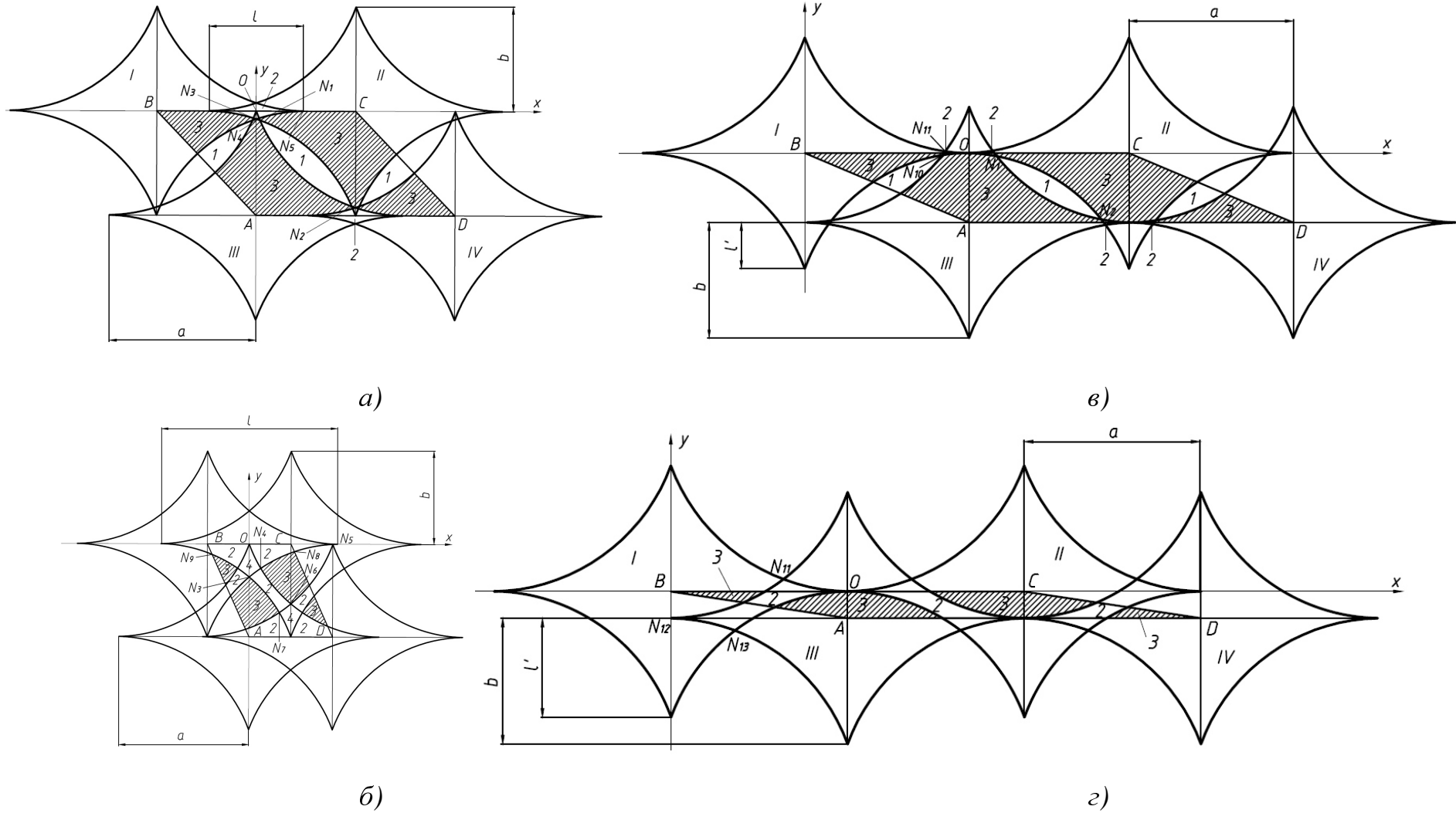


Рис. 3. Схема до розрахунку величин пропрацьованої одним зарядом і недопрацьованої площ при підірванні з розташуванням зарядів за шаховою мережею: 1–4 – області, що утворені від дії вибуху чотирьох зарядів; варіанти перекриття воронки дроблення:
 $a - l' = 0, l \leq 1,1a$; $б - l' = 0, l \geq 1,1a$; $в - l = 0, l' \leq 0,35a$; $г - l = 0, l' \geq 0,35a$

$$\begin{aligned}
S_{N_1 N_3 N_4} &= \int_{N_3}^{N_4} \left[\left[1 - \left(\frac{x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx + \\
&+ \int_{N_4}^{N_1} \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) - \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx; \\
S_{N_6 N_7 N_8 N_9} &= 2 \cdot \int_{N_6}^{N_7} \left[\left[1 - \left(\frac{x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx + \\
&+ \int_{N_7}^{N_9} \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) - \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx;
\end{aligned}$$

$$S_{N_6 N_7 N_{10} CO} = S_{N_6 N_7 N_{10} N_{11} O} - S_{N_{10} N_{11} C};$$

$$S_{N_6 N_7 N_{10} N_{11} O} = \int_0^{N_{11}} \left[\left[1 - \left(\frac{x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \right] dx;$$

$$S_{N_{10} N_{11} C} = \frac{N_{10} N_{11} \cdot CN_{11}}{2};$$

$$S_{N_6 N_7 N_{10} CO} = S_{N_6 N_{12} N_{13} BO} + S_{N_{13} N_{14} B};$$

$$S_{N_6 N_{12} N_{13} N_{14} O} = \int_0^{N_{14}} \left[1 - \left(\frac{-x + (a - \frac{l}{2})}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b \, dx;$$

$$S_{N_{13} N_{14} B} = \frac{N_{13} N_{14} \cdot BN_{14}}{2};$$

$$S_{N_1 N_{15} N_{16}} = \int_{N_1}^{N_{15}} \left[\left[1 - \left(\frac{-x+a}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) \right] - \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] dx +$$

$$+ \int_{N_{15}}^{N_{16}} \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] - \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] dx;$$

$$S_{N_{15} N_{16} N_{17} N_{18}} = \int_{N_{18}}^{N_{17}} \left[\left[1 - \left(\frac{-x+a}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) \right] - \left[\left[1 - \left(\frac{x-a}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) \right] dx +$$

$$+ \int_{N_{17}}^{N_{15}} \left[\left[1 - \left(\frac{-x+a}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - (b - \frac{l'}{2}) \right] - \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] dx +$$

$$+ \int_{N_{15}}^{N_{16}} \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] - \left[\left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot b - \frac{l'}{2} \right] dx.$$

Розрахунок пропрацьованої одним зарядом і недопрацьованої площ, що утворюються при підриванні зарядів, розташованих у шаховому порядку, проводився аналогічно прямокутній мережі. Залежності зміни V_n^{uu} та V_n^{uu} від k_l при $k_r = 0$ та від k_r при $k_l = 0$ наведено на рисунку 4.

Аналіз рисунку 4, a показав, що при збільшенні коефіцієнта перекриття k_l величина V_n^{uu} зменшується. При $k_l = 0,34$ спостерігається максимальне значення $V_n^{uu} = 96\%$, при цьому V_n^{uu} становить 1,21%. Отже, відстані між зарядами зі збільшенням коефіцієнтів перекриття зменшуються як при прямокутній, так і шаховій мережі свердловин.

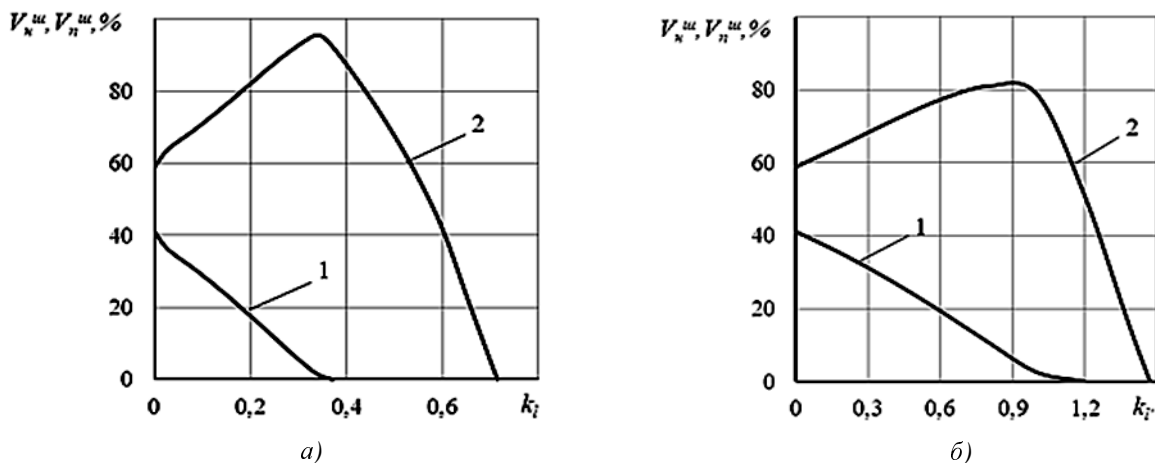


Рис. 4. Залежності зміни: а – V_n^w від k_f (1) та V_n^u від k_f (2);

б – V_n^w від k_f (1) та V_n^u від k_f (2)

За допомогою формули, наведеної в [10], проведено розрахунок радіусів великої і малої осей воронки дроблення залежно від величини діаметра заряду. Як вихідні дані для розрахунку прийняті: щільність вибухової речовини $\rho_{BP} = 950 \text{ кг/м}^3$; швидкість детонації ВР $D = 3300 \text{ м/с}$; щільність породи $\rho_n = 2500 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,2$; межа міцності гірської породи на розрив $\sigma_p = 10^7 \text{ Па}$; розмір кондиційного шматка $d_k = 0,8 \text{ м}$; розмір природної окреомості $d_e = 1 \text{ м}$; величина розкриття тріщин $\delta = 10^{-2} \text{ м}$; модуль Юнга матеріалу заповнювача $E_3 = 5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $K_a = 1,2$. Виходячи з отриманих даних визначалися величини a^3 і b_3 (табл. 1). Як видно з таблиці 1, при використанні бурового верстата Atlas Copco ($d_3 = 125 \text{ мм}$) величина $a_3 = 53,8d_3$, при цьому $b_3 = 13,3d_3$.

При використанні верстата Pantera ($d_3 = 127 \text{ мм}$) величина $a_3 = 54,8d_3$, b_3 відповідно $13,5d_3$.

Таблиця 1

Розрахунок відстаней між зарядами
залежно від діаметра коронки буріння

Параметр ПР	Діаметр коронки буріння, d_3 (мм) для верстатів							
	Pantera		Atlas Copco			СБШ		
	102	127	110	115	125	200	220	250
a_3 , м	2,8	3,5	3	3,1	3,4	5,4	5,9	6,7
b_3 , м	2,3	2,9	2,5	2,6	2,8	4,5	4,9	5,6
a_3/d_3	54,1	54,8	54,5	54,3	53,8	54	53,5	53,8
b_3/d_3	13,3	13,5	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,3

Висновки. Відстані між зарядами в ряду і між рядами визначаються за ступенем пропрацювання підшви уступу з урахуванням тріщинуватості гірської породи, конфігурації і розмірів воронки дроблення для випадків прямокутної та шахової мереж їх розташування. Показано, що відстані між зарядами при шаховій мережі розташування, порівняно з прямокутною, зумовлюють високу ефективність використання площі руйнування і при перекритті воронок дроблення на $0,34$ радіуса великої осі воронки дроблення можна досягти величини недопрацьованої площі руйнування масиву $1,21 \%$.

Список використаної літератури:

1. Воробьев В.Д. Методы дробления анизотропных пород на основе регулирования параметров импульса взрыва комбинированных зарядов (на примере карьеров нерудной промышленности) :

- автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.15.11 «Физические процессы горного производства» / В.Д. Воробьев ; ИГМ НАН Украины. – К., 1995. – 34 с.
2. Двоскин Е.М. Методика расчета удлиненных зарядов на рыхление / Е.М. Двоскин // Горн. журнал. – 1994. – № 10. – С. 42–45.
 3. Исследование влияния сетки скважин, диаметра заряда и удельного расхода ВВ на степень дробления взорванной массы в условиях трудновзрываеваемых пород Первоуральского рудника / П.С. Данчев, В.Н. Рождественский, К.Ш. Зайнуллин и др. // Взрыв. дело. – 1969. – № 69/26. – С. 194–201.
 4. Азаркович А.Е. Определение параметров взрывания скважинными зарядами, обеспечивающих заданный выход негабарита / А.Е. Азаркович // Горн. журнал. – 1985. – № 8. – С. 44–47.
 5. Тюпин В.Н. Параметры расположения скважинных зарядов в массивах с различной структурой / В.Н. Тюпин // Изв. вузов. Горн. журнал. – 1982. – № 6. – С. 58–61.
 6. Кутузов Б.Н. Проектирование массового взрыва в массиве, пронизанном естественными трещинами с заполнителем / Б.Н. Кутузов, В.Н. Тюпин // Изв. вузов. Горн. журнал. – 1982. – № 12. – С. 50–56.
 7. Фролов О.О. Оптимізація параметрів системи свердловинних зарядів для руйнування анізотропних масивів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.15.11 «Фізичні процеси гірничого виробництва» / О.О. Фролов ; ННДІОП. – К., 1998. – 17 с.
 8. Твердая О.Я. Определение расстояний между зарядами по степени проработки подошвы уступа на карьерах / О.Я. Твердая, В.Д. Воробьев, В.С. Прокопенко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2011. – Вип. 2/2011 (8). – С. 44–54.
 9. Крючков А.И. Методика расчета параметров взрывных работ в блочных массивах скальных пород на карьерах / А.И. Крючков, В.Д. Воробьев. – К. : АО «ВИПОЛ», 1995. – 54 с.
 10. Кутузов Б.Н. Определение размера зоны регулируемого дробления при взрыве заряда в трещиноватом массиве / Б.Н. Кутузов, В.Н. Тюпин // Изв. вузов. Горн. журнал. – 1979. – № 8. – С. 30–35.

ТВЕРДА Оксана Ярославівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерної екології Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- підривні роботи;
- ресурсозберігаючі технології підривних робіт;
- екологічні ризики.

Тел.: +380677440390.

E-mail: tverdaya@ukr.net.

ВОРОБИЙОВ Віктор Данилович – доктор технічних наук, професор кафедри інженерної екології Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- буропідривні роботи;
- ресурсозбереження в гірничій справі;
- екологія.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2015.