4. Samedov A. M. Raschet i proektirovanie podzemnyh sooruzhenij glubokogo zalozhenija / A. M. Samedov. (Monografija) NTUU «KPI» Kiev, 2012. – 649 s.

*Стаття надійшла до редакції 03.12.2013 р.*

УДК 622. 235

**В. Д. Воробйов, д. т. н., проф., О. М. Терентьєв, д. т. н., проф., О. Я. Тверда, к. т. н., ас. (НТУУ «КПІ»)**

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РАДІУСА ВОРОНКИ РУЙНУВАННЯ ТА КОЕФІЦІЄНТА АНІЗОТРОПІЇ У МАСИВІ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ ШАРАМИ РІЗНИХ ТИПІВ ПОРІД

**V. D. Vorobiov, doc. of tech. sc., prof., O. M. Terentiev, doc. of tech. sc., prof., O. Ya. Tverda, Ph.D, as. (NTUU “KPI”)**

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CRATER RADIUS AND ANISOTROPY COEFFICIENT IN THE ARRAY WITH VERTICAL LAYERS OF DIFFERENT TYPES OF ROCKS

*Наведено результати експериментальних досліджень із визначення радіуса воронки руйнування та коефіцієнта анізотропії. Встановлено залежності величини радіуса воронки руйнування, усередненого по довжині заряду радіуса воронки руйнування та коефіцієнта анізотропії від міцності гірської породи. Підтверджено високу збіжність теоретичних розрахунків радіуса воронки руйнування з експериментальними даними.*

***Ключові слова:*** *вибух, воронка руйнування, гірська порода, заряд, коефіцієнт анізотропії, радіус.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований по определению радиуса воронки разрушения и коэффициента анизотропии. Установлены зависимости величины радиуса воронки разрушения, усредненного по длине заряда радиуса воронки разрушения и коэффициента анизотропии от прочности горной породы. Подтверждена высокая сходимость теоретических расчетов радиуса воронки разрушения с экспериментальными данными.*

***Ключевые слова:*** *взрыв, воронка разрушения, горная порода, заряд, коэффициент анизотропии, радиус.*

*The results of experimental studies of determining the crater radius and the anisotropy coefficient are shown. Dependence of the crater radius, the averaged over the charge length crater*

*radius and the anisotropy coefficient on the strength of the rocks are set. High convergence of theoretical calculations of the crater radius with the experimental data are confirmed.*

***Keywords:*** *explosion, crater radius, rock, charge, anisotropy coefficient, radius.*

**Вступ.** Сучасні умови розробки родовищ корисних копалин характеризуються постійним збільшенням глибини кар'єрів і, як наслідок цього, зміною гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов. Отримання гірської маси забезпечується застосуванням буропідривного способу як основного процесу, який впливає на техніко-економічні показники наступних процесів та підприємства в цілому. Ефективність вибуху в скельних породах залежить від вибору параметрів підривних робіт (ПР) на стадії проектування.

Важливим показником при визначенні раціональних параметрів ПР на уступах кар'єрів скельних порід є радіус воронки руйнування. Цей параметр дозволяє більш обґрунтовано розраховувати відстані між зарядами та забезпечувати підвищення ефективності руйнування гірської маси. Однак, при визначенні відстаней між зарядами враховується величина радіуса воронки руйнування по поверхні уступу. Це спричиняє завищення розмірів мережі свердловинних зарядів, а як наслідок, зниження рівномірності руйнування гірської маси, занижений вміст кондиційного куска в розвалі після вибуху, утворення порогів по підошві уступу. Тому доцільним є визначення усередненого радіуса воронки руйнування по довжині заряду [1].

В роботі [2] на основі енергетичного підходу обґрунтовано аналітичну залежність для визначення усередненого радіуса воронки руйнування, значення якого пропонується використовувати при розрахунку параметрів ПР з метою зниження порогів по підошві уступу. Однак, справедливість цієї залежності вимагає підтвердження експериментальними даними.

**Метою роботи** є провести експериментальні дослідження із визначення усередненого радіуса воронки руйнування та співставити їх з результатами теоретичних розрахунків.

**Результати досліджень.** Експерименти із визначення радіуса воронки руйнування та анізотропії порід проводились на Шепетівському гранітному кар'єрі (Хмельницька обл.). Кар'єр розробляється одним видобувним уступом висотою 12-13,5 м і протяжністю 430 м. Уступ представлений вертикальними шарами наступних типів порід, що чергуються: граніти, граніти з гнейсами, граніти з прошарками кварцу та мігматити гранітовидного типу сірі та рідше рожевого кольору. Шари цих порід мають різну протяжність по фронту гірничих робіт з коефіцієнтом міцності порід за шкалою М.М. Протод'яконова в межах від 10 до 19,7.

Коефіцієнт анізотропії порід $K_a$ визначали по кожній виділеній заздалегідь зоні, що відповідає певному типу порід, за допомогою метода воронкоутворення [3]. У кожній зоні підривались укорочені свердловинні заряди масою 7,5 кг кожен, глибиною 1,2 м та діаметром 110 мм. В якості вибухової речовини (ВР) використовувався комполайт. Величина діаметра свердловини зумовлена наявним на підприємстві обладнанням, глибина заряду

підбиралася як мінімально можлива по відношенню до діаметра, а маса заряду визначалася відповідно до параметрів свердловини з вирахуванням забійки – 0,4 м.

Для визначення необхідної кількості експериментів $n_e$ на одну точку застосовували формулу математичної статистики [4]:

$$n_e = \left[ \left( k_{вар} / k_{доп} \right) \cdot t_н \right]^2, \text{ де:}$$

$k_{вар}$ – коефіцієнт варіації, %; $k_{доп}$ – допустима відносна похибка, %; $t_н$ – нормоване відхилення.

Коефіцієнт варіації, який чисельно дорівнює середньоквадратичному відхиленню $\sigma$, вираженому у відсотках від середнього арифметичного $\overline{X}$, визначався за формулою:

$$k_{вар} = (\sigma / \overline{X}) \cdot 100.$$

Величина коефіцієнта $k_{доп}$ для дослідних робіт приймається в межах 5-10 %. У нашому випадку $k_{доп}$ прийнятий рівним 10 %. Значення нормованого відхилення $t_н$ залежить від заданої надійності $P_н$. При $P_н$=0,90; $t_н$=1,28.

Таким чином, для гірничотехнологічних умов, що розглядаються, необхідне число вибухів у кожній зоні порід буде дорівнювати:

$$n_e = \left[ (12/10) \cdot 1,28 \right]^2 \approx 2.$$

У кожній зоні порід на уступі кар'єру проводилось по 2 вибухи укорочених свердловинних зарядів ВР.

*Оцінка результатів експериментів.* На першому етапі досліджень на Шепетівському гранітному кар'єрі виділялись зони за типами порід із визначенням їх довжини по фронту робіт та азимутів простягання тріщин. Використовуючи дані літературних джерел, визначались міцність порід, коефіцієнт Пуассона, модуль пружності та об'ємна маса для кожної зони порід.

На другому етапі проводилося підривання зарядів ВР для визначення $K_a$ по відношенню великої $a$ та малої $b$ осей воронки руйнування, тобто: $K_a = a/b$. При чому $a = D_1$ та $b = D_2$ (де $D_1$ та $D_2$ – діаметри воронки руйнування відповідно по осях $a$ і $b$).

Після аналізу експериментальних даних встановлювалась залежність $K_a$ від коефіцієнта міцності гранітів.

*Результати експериментальних досліджень.* За допомогою натурних вимірювань та даних геолого-розвідувальних робіт, наявних на підприємстві,

визначені ділянки (зони) за типами гірських порід зі встановленням їх розмірів (рис. 1).

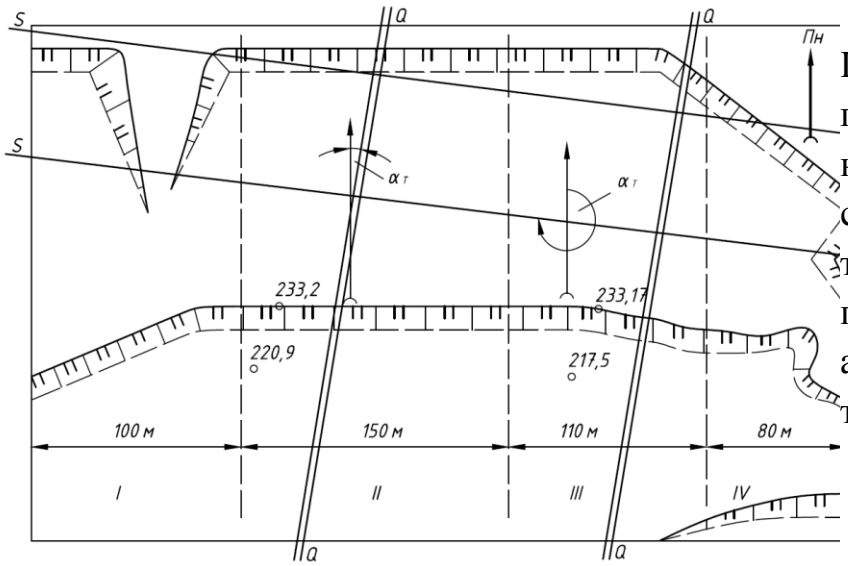



Рис. 1. План Шепетівського гранітного кар'єру з нанесенням на нього систем тріщин *S* і *Q* та зон за типами порід (I-IV); $\alpha_m$ – азимут простягання тріщин, градус

При цьому по довжині фронту видобувних робіт на уступі кар'єру виділено 4 зони за типами гірських порід: I – мігматити гранітовидного типу; II – граніти з гнейсами; III – граніти; IV – граніти з прошарками кварцу. У V-й зоні, розташованій за IV-ою, проводяться розкривні роботи. Чіткої межі між зонами, при переході одного типу порід в інший, не спостерігається. Тому на рис. 1 межі між зонами показані умовно.

Із аналізу табл. 1 видно, що середня максимальна величина *f* дорівнює 18,9, мінімальна –13,6. У такій же закономірності для порід змінюються і інші показники фізико-механічних властивостей.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості гірських порід за зонами видобувного уступу у кар'єрі

| Тип гірської породи | Коефіцієнт міцності по М.М. Прото-д'яконову *f* | Межа міцності на стиснення $\sigma_{стис}$, кг/см$^2$ | Коефіцієнт Пуассона, $\mu$ | Об'ємна маса $\gamma$, г/см$^3$ |
|---|---|---|---|---|
| Мігматит | $\frac{12,4-19,7}{16,05}$ | $\frac{1200-3480}{2340}$ | $\frac{0,19-0,27}{0,23}$ | $\frac{2,62-2,86}{2,74}$ |
| Гранітогнейс | $\frac{11,3-15,9}{13,6}$ | $\frac{1330-2750}{2040}$ | $\frac{0,12-0,24}{0,18}$ | $\frac{2,20-2,80}{2,50}$ |
| Граніт | $\frac{12,0-18,0}{15,0}$ | $\frac{1800-2640}{2220}$ | $\frac{0,08-0,34}{0,21}$ | $\frac{2,40-2,80}{2,60}$ |
| Граніт з прошарками кварцу (по кварцу) | $\frac{17,7-20,0}{18,9}$ | $\frac{2130-3100}{2615}$ | $\frac{0,18-0,31}{0,25}$ | $\frac{2,59-3,11}{2,85}$ |

Примітка. В чисельнику наведені межі зміни показників фізико-механічних властивостей, а у знаменнику – їх середнє значення.

Заміри азимутів простягання тріщин $\alpha_m$ (табл. 2) виконані за допомогою гірничого компаса тільки по системі *Q* як переважаючій з точки зору впливу на процес вибухового руйнування порід.

Із аналізу табл. 2 видно, що величина $\alpha_m$ змінюється в межах 349-33°, що підтверджують результати, наведені в роботі [5], і це повинно враховуватися при проектуванні параметрів ПР.

Таблиця 2. Результати заміру значень $\alpha_m$ (градус) по системі тріщин *Q*

| Номер зони порід на видобувному уступі | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | | II | | III | | IV | |
| 10 | 7 | 17 | 31 | 60 | 50 | 350 | 347 |
| 14 | 13 | 5 | 1 | 48 | 66 | 346 | 348 |
| 30 | 10 | 5 | 2 | 44 | 7 | 350 | 355 |
| 22 | 8 | 10 | 12 | 9 | 23 | 355 | 350 |
| 24 | 2 | 11 | 20 | 11 | 18 | 347 | 340 |
| 14 | | 12 | | 33 | | 349 | |

При визначенні $K_a$ для кожної зони на уступі кар'єру було проведено по два вибухи одиночних укорочених свердловинних зарядів ВР з параметрами: $d_з$=110 мм; $l_c$=1,2 м; $l_з$=0,8 м; $l_{заб}$=0,4 м; тип ВР – комполайт ГС6. Після підривання зарядів замірювались максимальний $D_{1max}$ і мінімальний $D_{2min}$ діаметри воронки руйнування по поверхні (рис. 2).

При цьому, діаметри воронки руйнування замірювались і в чотирьох точках по її глибині. За цими даними визначалися середні значення діаметрів $D'_{1max}$ та $D'_{2min}$. Коефіцієнт анізотропії визначався через відношення діаметрів у взаємноперпендикулярних напрямках(табл. 3).

Із аналізу табл. 3 видно, що зі збільшенням коефіцієнта міцності порід від 13,6 до 18,9 розміри $D_в$ зменшуються. При цьому розміри $D_в$ по поверхні уступу змінюються: для $D_{1max}$ – від 3,55 м до 2,83 м; для $D_{2min}$ – від 2,5 м до 2,48 м. Відповідно зменшується і коефіцієнт анізотропії $K_a$ – від 1,4 до 1,14, приймаючи середнє значення для всього уступу порід рівне 1,27 (з урахуванням округлення $K_a$=1,3).

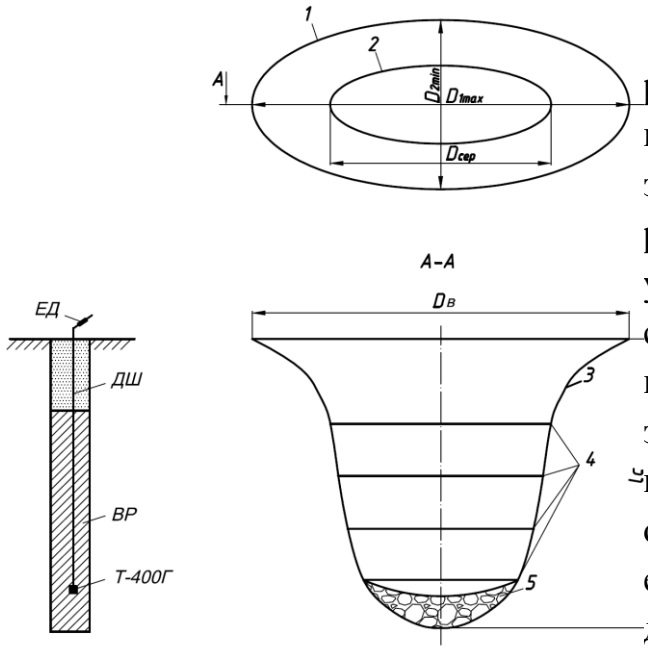



Рис. 2. Схема до визначення розмірів воронки руйнування від вибуху одиночного укороченого заряду ВР: 1 – контур воронки руйнування у плані по поверхні уступу; 2 – те ж, на рівні середнього діаметра; 3 – твірна воронки руйнування; 4 – точки заміру діаметрів по глибині воронки; 5 –гірська маса, яка осипалась на дно воронки; ЕД – електричний детонатор; ДШ – детонаційний шнур

Таблиця 3. Результати експериментальних досліджень по визначенню $K_a$ за зонами порід різної міцності на видобувному уступі кар'єру

| Зони (тип порід) | Розміри діаметрів по поверхні уступу, м | | $K_a$ | Розміри усереднених діаметрів воронки, м | | $K_a'$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $D_{1max}$ | $D_{2min}$ | | $D'_{1max}$ | $D'_{2min}$ | |
| I (мігматит) | 3,15<br>2,85 | 2,7<br>2,35 | 1,17<br>1,21 | 1,35<br>1,05 | 1,16<br>0,9 | 1,16<br>1,17 |
| Сер. | 3,0 | 2,50 | 1,19 | 1,2 | 1,03 | 1,17 |
| II (гранітогнейс) | 3,4<br>3,7 | 2,6<br>2,5 | 1,31<br>1,48 | 1,26<br>1,5 | 1,01<br>1,09 | 1,25<br>1,37 |
| Сер. | 3,55 | 2,55 | 1,40 | 1,38 | 1,05 | 1,31 |
| III (граніт) | 3,6<br>3,3 | 2,47<br>2,53 | 1,24<br>1,41 | 1,46<br>1,22 | 1,14<br>0,99 | 1,28<br>1,23 |
| Сер. | 3,45 | 2,5 | 1,33 | 1,34 | 1,06 | 1,26 |
| IV (граніт з прошарками кварцу) | 2,75<br>2,9 | 2,45<br>2,5 | 1,12<br>1,16 | 1,06<br>1,22 | 0,98<br>1,08 | 1,08<br>1,13 |
| Сер. | 2,83 | 2,48 | 1,14 | 1,14 | 1,03 | 1,10 |

Розміри воронки руйнування по її середині мають аналогічну закономірність, але з меншими числовими значеннями. Максимальне значення $D'_{1max}$ змінюється від 1,38 до 1,14 м, а $D'_{2min}$ – від 1 до 1,1 м (з урахуванням

округлення). Значення $K_a'$ зі збільшенням $f$ зменшується від 1,31 до 1,10. Для порід всього уступу середнє значення $K_a$ дорівнює 1,2.

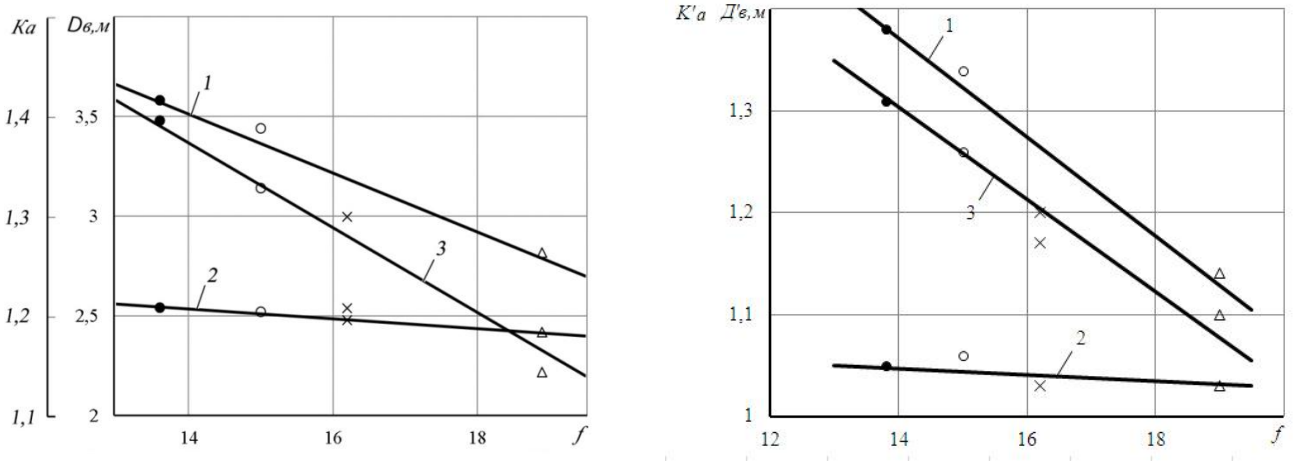
Графічна інтерпретація залежностей розмірів воронки руйнування від коефіцієнта міцності порід наведена на рис. 3. Характер зміни $D_в$ та $K_a$ має лінійну залежність, яка для випадку оголеної поверхні (рис. 3.*а*) апроксимується наступними рівняннями:

$$D_{1max}=-0,15f+5,58;$$
$$D_{2min}=-0,02f+2,88;$$
$$K_a=-0,21f+6,34,$$

а для випадку середніх діаметрів, залежність цих параметрів від величини $f$ (рис. 3.б) має вигляд:

$$D'_{1max}=-0,12f+4,62;$$
$$D'_{2min}=-0,02f+2,6;$$
$$K_a'=-0,2f+5,74.$$

Таким чином, отримані результати експериментальних досліджень по визначенню $K_a$ в породах різного типу і з різною величиною $f$ свідчать про неоднозначність цього критерію при оцінці анізотропності порід. Величини $D_в$, заміряні по поверхні уступу та по середині воронки руйнування відрізняються між собою на 10 %. У першому випадку $D_в$ найбільший за рахунок порушеного верхнього шару порід і тому використання його при розрахунку параметрів ПР може привести до незадовільних результатів. У другому випадку $K_a$ менше у порівнянні з першим в 1,1 рази (на 10 %).




а б

Рис. 3. Залежність розмірів воронки руйнування по оголеній поверхні уступу при підриванні заряду ВР (а) та по середині воронки (б) за зонами порід від коефіцієнту їх міцності:

• – гранітогнейс; ○ – граніт; × – мігматит; Δ – граніт з прошарками кварцу; 1 – $D_{1max}$; 2 – $D_{2min}$; 3 – коефіцієнт анізотропії $K_a$

Достовірність визначення $K_a$ є важливим фактором, так як від нього залежать, в першу чергу, геометрія та розміри мережі свердловинних зарядів, а також і напрямок фронту відбійки порід вибухом. У зв'язку з цим у процесі проектування параметрів ПР слід надавати перевагу величині $K_a$, яка визначена за середнім $D_в$ (або середнім радіусом).

З метою порівняння результатів теоретичного та експериментального досліджень проведено теоретичний розрахунок радіуса воронки руйнування для наступних умов: радіус свердловини $r_c$=0,1 м; довжина свердловини $l_c$=12 м; довжина забійки $l_{заб}$=4 м; модуль пружності $E$=10$^4$Па; $\Delta$=0,9; $\rho_{ВР}$=872 кг/м$^3$; $D$=3150 м/с; $Q$=3864,4·10$^3$ Дж/кг; $\sigma_n$=1,143 Дж/м$^2$; $\sigma_{кр}$=25·10$^6$ Па; $l_{тр}$=0,01 м, враховуючи дані табл. 4.

Таблиця 4. Результати теоретичного розрахунку радіуса воронки руйнування в різних зонах гірських порід Шепетівського гранкар'єру [2]

| Тип породи | $\rho_n$, кг/м$^3$ | $c_n$, м/с | $\mu$ | $r_p$, м | $\overline{r_p}$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| Мігматити | 2740 | 5550 | 0,23 | 6,4 | 2,6 |
| Гранітогнейси | 2500 | 3500 | 0,18 | 7,2 | 3 |
| Граніти | 2600 | 4900 | 0,21 | 7 | 2,9 |
| Граніти з прошарками кварцу | 2850 | 6000 | 0,25 | 5,3 | 2,2 |

Таблиця 5. Результати порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками радіуса воронки руйнування

| Тип породи | Теоретичні розрахунки | | Експериментальні дані | | Відносна похибка, % | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $r_p$, м | $\overline{r_p}$, м | $r_p$, м | $\overline{r_p}$, м | $r_p$, м | $\overline{r_p}$, м |
| Мігматити | 1,62 | 0,64 | 1,5 | 0,6 | 8 | 6 |
| Гранітогнейси | 1,82 | 0,72 | 1,78 | 0,69 | 2,2 | 4,2 |
| Граніти | 1,78 | 0,7 | 1,73 | 0,67 | 2,9 | 4 |
| Граніти з прошарками кварцу | 1,36 | 0,54 | 1,42 | 0,57 | 4,4 | 5 |

Отримані результати експериментальних досліджень по визначенню $\overline{r_p}$ в породах різного типу добре співвідносяться з теоретичними розрахунками. Відносна похибка експерименту складає не більше 10 %.

## Висновки

Встановлено експериментальні залежності величини радіуса воронки руйнування, усередненого по довжині заряду радіуса воронки руйнування та коефіцієнта анізотропії від міцності гірської породи. Так, для мігматитів усереднений радіус воронки руйнування склав 0,6 м, а для гранітів при тих же умовах 0, 7 м. Отримані результати експериментальних досліджень по визначенню $\overline{r_p}$ в породах різного типу співвідносяться з теоретичними розрахунками так, що відносна похибка експерименту складає не більше 10 %.

## Список використаних джерел

1. Tverdaja O. Ja. Obosnovanie jeffektivnogo radiusa voronki droblenija pri vzryvah v anizotropnyh skal'nyh porodah / O. Ja. Tverdaja, V. D. Vorob'ev, A. I. Krjuchkov // Visnik NTUU «KPI». Serija «Girnictvo»: Zb. nauk. prac'. – 2011. – Vip. 21. – S. 56-63.

2. Jenergeticheskij podhod k opredeleniju razmerov zon razrushenija pri vzryve v skal'nyh porodah / A. M. Masjukevich, V. D. Vorob'ev, O. Ja. Tverdaja, V. S. Prokopenko// Visnik NTUU «KPI». Serija «Girnictvo»: Zb. nauk. prac'. – 2012. – Vip. 22. – S. 65-70.

3. Vajnshtejn B. I. Analiz metodov opredelenija rabotosposobnosti VV / B. I. Vajnshtejn, K. S. Chernov, M. K. Pesockij // Vzryv. delo. – 1982. – № 84/41. – S. 75-83.

4. Baron L. I. Gornotehnologicheskoe porodovedenie. Predmet i sposoby issledovanij / L. I. Baron – M.: Nauka, 1977. – 324 s.

5. Vorob'ev V. D. Metody droblenija anizotropnyh porod na osnove regulirovanija parametrov impul'sa vzryva kombinirovannyh zarjadov (na primere kar'erov nerudnoj promyshlennosti): avtoref. dis. na soisk. uch. ctepeni dokt. tehn. nauk: spec. 05.15.11 «Fizicheskie processy gornogo proizvodstva» / V. D. Vorob'ev; IGM NAN Ukrainy. – K., 1995. – 34 s.

*Стаття надійшла в редакцію 12.12.2013 р.*