УДК 622.235

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО РАДИУСА ВОРОНКИ ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ В АНИЗОТРОПНЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

О. Я. Твердая, магистр, В. Д. Воробьев, докт. техн. наук, А. И. Крючков, канд. техн. наук (НТУУ «КПИ»), В. С. Прокопенко, докт. техн. наук (ЧАО «Техновзрыв»)

Встановлено залежність середнього радіуса воронки дроблення від акустичного імпедансу ВР, а також залежність відстаней між зарядами та роботоздатності різних ВР від середнього радіуса воронки дроблення з урахуванням анізотропії гірських порід.

Ключові слова: анізотропія, вибух, гірська порода, заряд, роботоздатність, радіус дроблення.

Установлена зависимость среднего радиуса воронки дробления от акустического импеданса ВВ, а также зависимость расстояний между зарядами и работоспособности различных ВВ от среднего радиуса воронки дробления с учетом анизотропии горных пород.

Ключевые слова: анизотропия, взрыв, горная порода, заряд, работоспособность, радиус дробления.

Dependence of change in the average radius of the cone of the crater on the acoustic impedance of the explosive, as well as the distances between the charges and efficiency of various explosives on the average radius of the crater in view of anisotropy of rocks are set.

Key words: anisotropy, explosion, rock, charge, efficiency, radius of the crater.

Введение. Эффективность взрыва в скальных породах в значительной степени зависит от правильного определения его параметров на стадии проектирования. При этом технологическая эффективность реализации данного процесса зависит от выбора методики расчета параметров. В современной практике взрывных работ (ВР) используют различные подходы при определении параметров взрыва, как правило, традиционные [1–3], не учитывающие в достаточной степени последние научные и практические достижения [4]. Наряду с этим следует отметить, что в последние годы стали использовать современное буровое оборудование зарубежного производства, новые взрывчатые вещества (ВВ), средства инициирования (волноводы типа «Nonel»), под которые рассчитывают параметры ВР.

Анализ практики ВР на нерудных карьерах показывает, что не всегда могут быть обеспечены высокое качество горной массы и безопасность работ. На наш взгляд, одним из условий устранения указанных недостатков является повышение надежности расчетов при подготовке проектов на производство массовых взрывов на основе использования новых зависимостей, описывающих влияние геометрических параметров одиночных и групповых зарядов, новых типов ВВ и других факторов на результаты взрыва.

Важным показателем для определения оптимальных параметров ВР при отработке скальных пород на уступах карьеров является радиус воронки дробления $r_д$, образующейся при взрыве одиночного скважинного заряда [5].

Этот параметр позволяет более обоснованно рассчитывать расстояния между скважинными зарядами и обеспечивать повышение качества дробления пород за счет равномерного распределения энергии взрыва по массиву [6].

В практике проектирования ВР при определении расстояний между зарядами в ряду $a_з$ и между рядами $b_з$ чаще всего используются значения $r_д$, полученные по результатам экспериментов, проведенных в конкретных горнотехнологических условиях методом воронкообразования. Однако такой подход является достаточно трудоемким, особенно в массиве горных пород с различными структурно-текстурными особенностями, и в ряде случаев не обеспечивает высокую достоверность результатов измерений.

Известно достаточное количество научных работ, посвященных теоретическому определению радиуса дробления скальных пород при взрывных работах в карьерах. В частности, значительный вклад в исследования по определению $r_д$ внесли Э. И. Ефремов, В. М. Комир, Б. Н. Кутузов, П. И. Федоренко, А. А. Фролов и др. [6–18]. Однако данные, полученные с помощью этих расчетов, существенно отличаются от экспериментальных данных. Поэтому зачастую наблюдается, с одной стороны, наличие завышенных порогов по подошве уступа и большой выход негабарита, с другой – переизмельчение горной массы, что обусловливает дополнительные трудозатраты и потери полезного ископаемого.

Наиболее достоверным является изменение радиуса воронки дробления по длине скважинного заряда $r_д = f(l)$, где l – координата точки по длине заряда. Теоретически доказано, что характер этой зависимости отвечает экспериментальным данным при взрывах в натурных условиях горнодобывающих предприятий [8].

Цель работы – обоснование эффективного радиуса воронки дробления и геометрических параметров расположения скважинных зарядов ВВ при взрывах различных типов ВВ в анизотропных массивах скальных пород на карьерах.

Изложение результатов исследований. С помощью формул для расчета величины $r_д$ в любой точке по длине заряда, приведенных в [8] с учетом [10], обоснованы конфигурации боковых поверхностей воронок дробления от взрывов одиночных зарядов ВВ: граммонита 79/21, полимикса ГР4-Т10, комполайта ГС6, полимикса ГР1/8 (74%) + КЖУ2 (26 %) и полимикса ГР1/8 (85 %) + КЖУ2 (15 %) (рис. 1). В качестве исходных данных для расчета приняты: радиус заряда $r_з$ = 0,25 м; плотность породы $\rho_п$ = 2500 кг/м^3; коэффициент Пуассона ν = 0,2; предел прочности горной породы на разрыв $\sigma_р$ = 10^7 Па; размер кондиционного куска d_k = 0,8 м; размер естественной отдельности $d_е$=1 м; величина раскрытия трещин δ = 10^{-2} м; модуль Юнга материала заполнителя трещин $E_з$ = $5\cdot10^7$ Па, а также данные табл. 1. Приведенные на рис. 1 зависимости включают длину забойки скважинного заряда, равную 4 м, и описываются полиномом третьего порядка с соответствующими коэффициентами регрессии (табл. 2):

$$r_д = al^3 + bl^2 + cl + d. \qquad (1)$$

Таблица 1. Характеристики простейших ВВ местного приготовления

Тип ВВ	$\rho_{ВВ}$, кг/м^3	*D*, м/с	*P*, ГПа
Граммонит 79/21	950	3300	1,6
Комполайт ГС6	852	2550	0,88
Полимикс ГР4-Т10	872	3150	1,36
Полимикс ГР1/8 (74%)+КЖУ2 (26%)	1000	3900	2,27
Полимикс ГР1/8 (85%)+КЖУ2 (15%)	950	3700	1,97

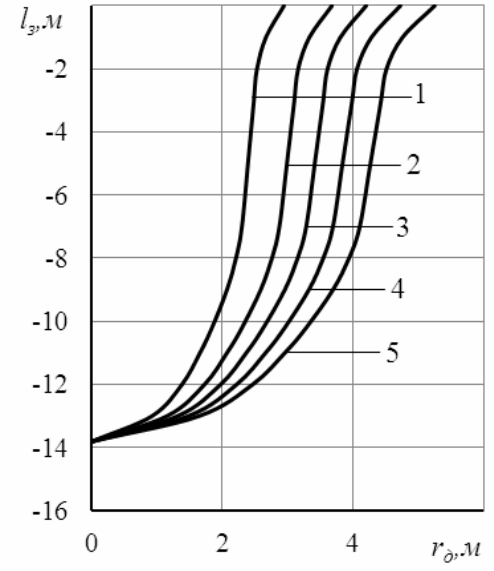

Рис. 1. Изменение радиуса зоны дробления $r_д$ по длине скважинного заряда при взрыве: *1* – комполайта ГС6; *2* – полимикса ГР4-Т10; *3* – граммонита 79/21; *4* – полимикса ГР1/8 (85 %) + КЖУ2 (15 %); *5* – полимикса ГР1/8 (74 %) + КЖУ2 (26 %)

Таблица 2. Коэффициенты регрессии в формуле (1)

№ зависимости	*a*	*b*	*c*	*d*
1	0,0033	0,05	0,3	2,94
2	0,0042	0,07	0,37	3,68
3	0,0048	0,08	0,43	4,21
4	0,0054	0,09	0,48	4,73
5	0,006	0,1	0,53	5,26

При определении расстояния между зарядами $a_з$ необходимо, чтобы зоны дробления смежных зарядов перекрывались на одну треть величины $r_д$ [5]. Однако в практике эту величину, как правило, принимают по поверхности разрушаемого горного массива, что также обусловливает «пороги» между зарядами по подошве уступа и требует дальнейшей их ликвидации взрывным способом. Использование данного подхода к определению $r_д$ приводит к отрицательным результатам и по другим критериям его оценки (заколы в тыл массива, увеличение дальности разлета кусков породы, увеличение параметров развала горной массы и др.). Поэтому наиболее целесообразным может быть использование усредненного значения $\overline{r_д}$ по длине заряда $l_з$ [8].

Согласно теореме Лагранжа [19] величину $\overline{r_д}$ можно записать в следующем виде:

$$\overline{r_д} = \frac{\int_0^{l_з} \left(al^3 + bl^2 + cl + d\right) dl}{l_з}. \qquad (2)$$

Результаты расчета величин $\overline{r_д}(a)$, $\overline{r_д}(b)$ и $a_з \times b_з$, для различных типов ВВ представлены в табл. 3 (при K_a = 1,1; $\alpha_{тз}$ = 60°). Зависимость $\overline{r_д}(a)$ от акустического импеданса ВВ изображена на рис. 2 и аппроксимируется уравнением вида:

$$\overline{r_д}(a) = 0{,}98 \cdot \rho_{ВВ} \cdot D + 0{,}01.$$

Следовательно, расстояния между зарядами (рис. 3) в любом азимутальном направлении [5], но с учетом $\overline{r_д}(a)$ могут быть определены по формуле

$$a_з = 1{,}67\overline{r_д}(a) / \sqrt{\left[1 - \sin^2 \alpha_{тз}\left(1 - K_a^2\right)\right]} = 1{,}67\overline{r_д}(a)\left[1 - \sin^2 \alpha_{тз}\left(1 - K_a^2\right)\right]^{-1/2},$$

где $\overline{r_д}(a)$ и $\overline{r_д}(b)$ – радиусы эллипсовидной зоны дробления, усредненные по длине скважинного заряда в направлениях большой и малой ее полуосей, м; $\alpha_{тз}$ – угол между направлением основной системы трещин и линией забоя, град; K_a – коэффициент анизотропии (K_a = 1,05–1,4). Величина $b_з$ рассчитывается аналогично величине $a_з$ при $\alpha'_{тз} = 180^\circ - (\alpha_{тз} + 90^\circ)$.

Таблица 3. Результаты расчета размеров сетки скважин при использовании ВВ местного приготовления

Тип ВВ	$\overline{r_д}$, м	$\overline{r_д}(a) = \overline{r_д}(K_a + 1)/2$, м	$\overline{r_д}(b) = \frac{2\overline{r_д}}{K_a + 1}$, м	Расстояние, м		$S = a_з \times b_з$, м^2
				$a_з$	$b_з$	
Граммонит 79/21	2,9	3,1	2,8	4,78	5,01	23,95
Компoлайт ГС6	2,1	2,2	2	3,42	3,58	12,24
Полимикс ГР4-Т10	2,5	2,6	2,4	4,1	4,3	17,63
Полимикс ГР1/8 (74 %) +КЖУ2 (26 %)	3,7	3,9	3,5	5,98	6,27	37,49
Полимикс ГР1/8 (85 %) +КЖУ2 (15 %)	3,3	3,5	3,2	5,46	5,73	31,29

Из анализа табл. 3 видно, что с увеличением $\overline{r_д}(a)$ значение $a_з$ возрастает. Так, при $\overline{r_д}(a)$ = 2,2 м величина $a_з$ = 3,42 м, а при $\overline{r_д}(a)$ = 3,9 м – $a_з$=5,98 м. Зависимость $a_з = f(\overline{r_д}(a))$ носит линейный характер (рис. 4) и аппроксимируется следующим уравнением:

$$a_з = 1{,}71\,\overline{r}_д(a) + 0{,}15.$$

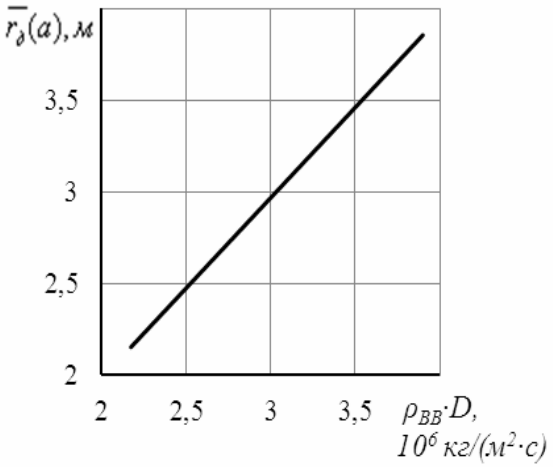

Рис. 2. Изменение усредненного радиуса зоны дробления по длине скважинного заряда в направлении большой ее полуоси в зависимости от типа ВВ

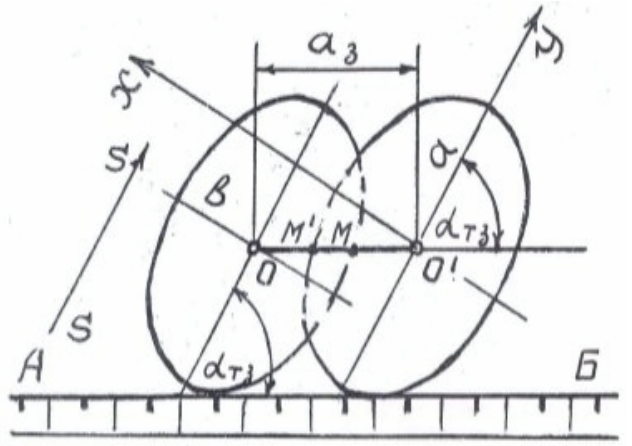

Рис. 3. Схема к расчету расстояния между зарядами $a_з$ с учетом анизотропии пород: $OM=O'M'=\overline{r}_д$; $M'M=1/3\ \overline{r}_д$; $OO'=1{,}67\ \overline{r}_д$; *АБ* – линия свободной поверхности уступа пород; *S–S* – азимут простирания основной системы трещин, град; $OO'=a_з$

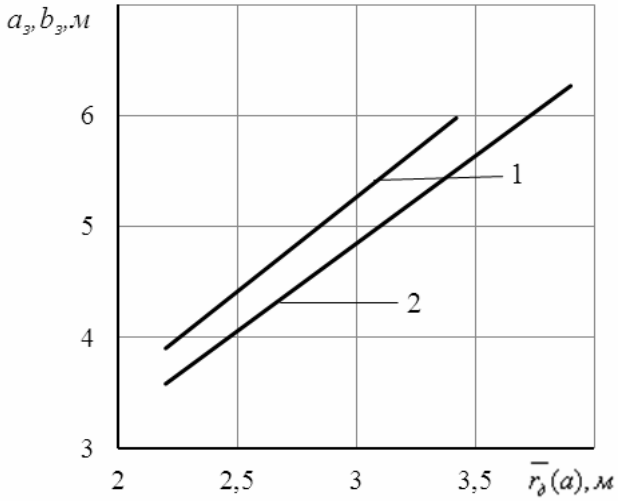

Рис. 4. Изменение расстояний между зарядами в направлении оси *a*: *1* – $a_з=f(\overline{r}_д)$; *2* – $b_з = f(\overline{r}_д)$

Аналогичная ситуация наблюдается и с изменением величин $b_з$ и площади *S* относительно $\overline{r}_д(a)$. При увеличении $\overline{r}_д(a)$ от 2,2 до 3,9 м расстояние между рядами также увеличивается от 3,58 до 6,27 м (см. рис. 4). Зависимость изменения $b_з$ от $\overline{r}_д(a)$ аппроксимируется уравнением прямой

$$b_з = 1{,}58\ \overline{r}_д(a) + 0{,}1.$$

Площадь *S* в пределах сетки скважин увеличивается от 12,24 до 37,49 м^2 при увеличении $\overline{r}_д(a)$ от 2,2 до 3,9 м.

Предложенный подход позволяет также оценивать техническую и энергетическую эффективности ВВ для взрывания конкретного типа пород по

объему воронки дробления $V_в$. Этот показатель рассчитывался по формуле для тела вращения вокруг оси [20]:

$$V_в = \pi \cdot \int_0^{l_з} (al^3 + bl^2 + cl + d)^2 \, dl.$$

По соотношению $V_в$ для исследуемых и эталонного (граммонит 79/21) ВВ определяли относительную работоспособность *e* (табл. 4).

Как следует из рис. 1, наиболее эффективным ВВ является полимикс ГР1/8 (74 %) + КЖУ2 (26 %), при использовании которого образуется воронка объе-мом 637,89 м^3. Наименее эффективным для данного типа пород является комполайт ГС6, при взрыве которого образуется воронка объемом 204,83 м^3, что в 3,1 раза меньше по сравнению с первым. Коэффициент работоспособности комполайта ГС6 составляет 0,5, а полимикса ГР1/8 (74 %) + КЖУ2 (26 %) – 1,56. Это свидетельствует о повышенной энергетической эффективности последнего типа ВВ.

На рис. 5 представлены зависимости объема воронки дробления от акустического импеданса ВВ и среднего давления в скважине, равного половине давления в точке Жуге. Как следует из рисунка, с увеличением акустического импеданса $\rho_{ВВ}D$ возрастает и значение $V_в$. Так, при $\rho_{ВВ}D$, равном $2{,}17 \cdot 10^6$ кг/м^2·с, характерным для комполайта ГС6, объем воронки дробления составляет 204,83 м^3, а при $\rho_{ВВ}D = 3{,}52 \cdot 10^6$ кг/м^2·с, характерным для полимикса ГР1/8 (85 %) + КЖУ2 (15 %) – 516,7 м^3, что в 2,5 раза больше. При P = 1,36 ГПа объем воронки дробления равен 312,63 м^3, а при P = 2,27 ГПа – 637,89 м^3. Зависимости $V_в = f(\rho_{ВВ}D)$ и $V_в = f(P)$ аппроксимируются следующими уравнениями:

$$V_в = 52{,}07(\rho_{BB}D)^2 - 64{,}67\rho_{BB}D + 98{,}95;$$

$$V_в = 84{,}92P^2 + 44{,}56P + 99{,}41.$$

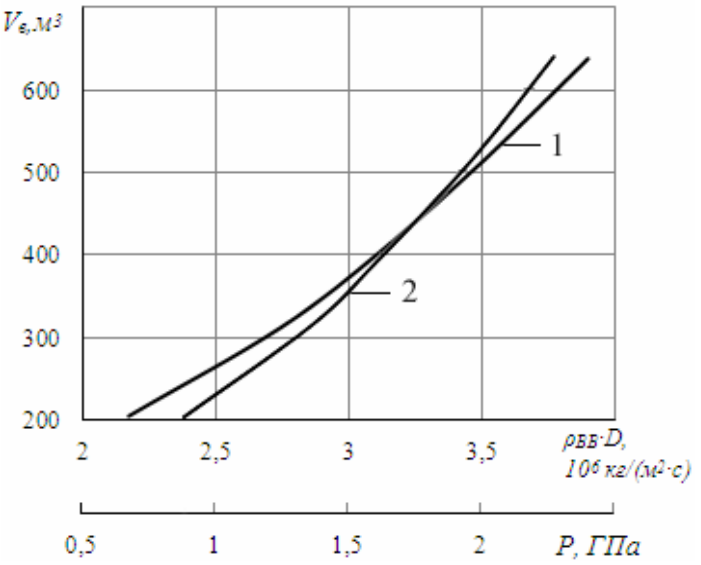

Рис. 5. Зависимости: *1* – $V_в=f(\rho_{ВВ}D)$; *2* – $V_в=f(P)$

Таблица 4. Результаты расчета технической и энергетической эффективности ВВ

Тип ВВ	$V_в$, м^3	*e*
Граммонит 79/21	408,28	1
Комполайт ГС6	204,83	0,5
Полимикс ГР4-Т10	312,63	0,77
Полимикс ГР1/8 (74 %) + КЖУ2 (26 %)	637,89	1,56
Полимикс ГР1/8 (85 %) + КЖУ2 (15%)	516,7	1,27

Основные выводы и результаты аналитических расчетов могут быть использованы при проектировании параметров взрывных работ в различных горнотехнологических условиях горнодобывающих предприятий.

Выводы

Обоснованы аналитическая зависимость среднего радиуса воронки дробления от акустического импеданса ВВ, зависимость расстояний между зарядами от среднего радиуса воронки дробления, а также зависимость работоспособности различных ВВ от объема воронки разрушения с учетом анизотропии горных пород. Полученные зависимости предназначены для использования при оперативном проектировании параметров взрывных работ, базирующихся на дифференцированном учете свойств и строения анизотропного массива скальных пород при соответствии им энергетических характеристик простейших современных ВВ местного приготовления.

Реализация данного подхода к процессу проектирования может обеспечить повышение ресурсосбережения с достижением значительной технико-экономической и экологической эффективности в условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых.

1. *Технологические правила* ведения взрывных работ на дневной поверхности. – М.: Недра, 1972. – 240 с.

2. *Афонин В. Г.* Справочное пособие по взрывным работам в строительстве / В. Г. Афонин, Л. М. Гейман, В. М. Комир. – К.: Будівельник, 1982. – 176 с.

3. *Бруякин А. В.* Расчет параметров расположения скважинных зарядов / А. В. Бруякин // Горн. журнал. – 1994. – № 10. – С. 32–33.

4. *Кравець В. Г.* Підривні роботи на кар’єрах / В. Г. Кравець, В. Д. Воробйов, А. О. Кузьменко / Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1994. – 376 с.

5. *Воробьев В. Д.* Методы дробления анизотропных пород на основе регулирования параметров импульса взрыва комбинированных зарядов (на примере карьеров нерудной промышленности): автореф. дис. на соиск. уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.15.11 «Физические процессы горного производства» / В. Д. Воробьев; ИГМ НАН Украины. – К., 1995. – 34 с.

6. *Воробьев В. Д.* Проектирование исходных параметров взрывных работ / В. Д. Воробьев, А. А. Фролов // Уголь Украины. – 1999. – № 11–12. – С. 34–36.

7. *Фролов О. О.* Оптимізація параметрів системи свердловинних зарядів для руйнування анізотропних масивів: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук:

спец. 05.15.11 «Фізичні процеси гірничого виробництва» / О. О. Фролов; ННДІОП. – К., 1998. – 17 с.

8. *Воробьев В. Д.* О радиусе воронки дробления в скальных породах при взрыве удлиненного заряда ВВ / В. Д. Воробьев, А. М. Масюкевич, И. В. Косьмин // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 7. – С. 44–54.

9. *Воробьев В. Д.* Взрывные работы в скальных породах / В. Д. Воробьев, В. В. Перегудов. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 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.

11. *Фролов О. О.* Встановлення розмірів і форми зони руйнування при вибуху системи свердловинних зарядів / О. О. Фролов // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2009. – Вип. 1/2009 (3). – С. 100–105.

12. *Фокин В. А.* Оценка размера зоны отрыва породы при скважинной отбойке в карьерных условиях / В. А. Фокин // Изв. вузов. Горн. журнал. – 2007. – № 2. – С. 65–68.

13. *Калякин С. А.* Теоретические и экспериментальные исследования действия взрыва заряда взрывчатого вещества в горной породе / С. А. Калякин, К. Н. Лабинский // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2008. – Вип. 2/2008 (2). – С. 39–46.

14. *Турута Н. У.* Разрушение трещиноватых пород под действием взрыва / Н. У. Турута, А. В. Бруякин // Технологии открытых горных работ: Сб. статей. – 1971. – С. 39–47.

15. *Механика взрывного* разрушения пород различной структуры / [Э. И. Ефремов, В. Д. Петренко, Н. П. Рева и др.]. – К.: Наук. думка, 1984. – 192 с.

16. *Разрушение горных* пород энергией взрыва / [Э. И. Ефремов, В. С. Кравцов, Н. И. Мячина и др.]. – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.

17. *Ресурсосберегающие технологии* взрывного разрушения горных пород / [Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский и др.]. – К.: Техника, 1990. – 149 с.

18. *Кутузов Б. Н.* Взрывное и механическое разрушение горных пород / Кутузов Б. Н. – М.: Недра, 1973. – 312 с.

19. *Блюмин С. Л.* Экономический факторный анализ / С. Л. Блюмин, В. Ф. Суханов, С. В. Чеботарев. – Липецк: ЛЭГИ, 2004. – 148 с.

20. *Гончаренко Ю. В.* Короткий довідник з курсу вищої математики: версія 5.1 / Гончаренко Ю. В. – К.: Допомога, 2005. – 64 с.

Надійшла до редакції 8.09.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф. В. Г. Кравцем