**SUBSTANTIATION OF THE APPLICATION OF ELECTRONIC
INITIATION OF SYSTEMS OF BOREHOLE CHARGES FOR
SHORT-DELAYED BLASTING AT QUARRIES**

A. Frolov, T. Kosenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
vul. Borschagivska, 115, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Purpose. Justification of the application of electronic initiation of systems of borehole explosive charges in microsecond short-delayed blasting to form effective modes of interaction of the energy flows of the explosion. **Methodology.** For solving scientific research problems, a comprehensive research method was used, which consists of analysis and generalization of previous scientific developments on the study of the effectiveness of short-delayed blasting, analytical justification for the need to slowdown between the initiation of adjacent borehole charges in a group, modeling the effect of an explosion in the «K-MINE» geoinformation system. **Results.** The expediency of using electronic initiation of borehole charges in drilling and blasting operations in quarries by the method of combined short-delayed blasting is shown. The results of modeling the action of a mass explosion in magnetite quartzites in the K-MINE geoinformation system showed the formation of a more complex stress state of the rock mass in comparison with traditional blasting. **Originality.** The originality of the proposed method of short-delayed blasting consists in the formation of microsecond slowdowns between blasting borehole charges both in the group and between groups using electronic initiation, which allows to set the time of the explosion of each individual explosive charge. **Practical value.** Conducted experimental explosions of industrial blocks of massifs showed the high efficiency of combined short-delayed blasting. It allows to increase the distance between the wells by 20-25% while maintaining the quality of the rock mass explosion.

Key words: explosion, charge, initiation, massif, rock, borehole, quarry.

**ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ІНІЦІЮВАННЯ
СИСТЕМ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ**

ПРИ КОРОТКОСПОВІЛЬНЕНОМУ ПІДРИВАННІ НА КАР'ЄРАХ

О. О. Фролов, Т. В. Косенко

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03156, Україна. E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Виконано обґрунтування необхідності застосування електронного ініціювання систем свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР) для мікросекундного короткосповільненого підривання на кар'єрах з метою формування ефективних режимів взаємодії енергетичних потоків вибуху. Для розв'язання поставлених науково-дослідних завдань використано комплексний метод досліджень, який складається з аналізу і узагальнення попередніх наукових розробок з дослідження ефективності сповільненого підривання, аналітичного обґрунтування необхідності формування сповільнення між ініціюванням поруч розташованих

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРИВНИХ РОБІТ НА ДЕННІЙ ПОВЕРХНІ Й У ПІДЗЕМНИХ УМОВАХ

свердловинних зарядів у групі та моделювання дії масового вибуху в геоінформаційній системі «K-MINE». Запропоновані формули для визначення інтервалів сповільнення між підриванням груп свердловинних зарядів та між зарядами вибухових речовин у груп. Рекомендовані до застосування схеми короткостовільного підривання, що дозволяють реалізувати комбінований мікросповільнений вибух. Оригінальність запропонованого методу підривання полягає в формуванні мікросекундних сповільнень між підриванням свердловинних зарядів як в групі, так і між групами за допомогою електронного ініціювання, яке дозволяє формувати час вибуху кожного окремого заряду вибухової речовини. Результати моделювання дії мікросекундного короткостовільного підривання в магнетитових кварцитах показали, що при забезпеченні сповільнення між свердловинними зарядами в групі формується більш складний напружений стан гірського масиву в порівнянні з традиційним підриванням. Проведені експериментальні вибухи на промислових блоках гірських масивів показали високу ефективність комбінованого короткостовільного підривання. Воно дозволяє збільшити відстані між свердловинними зарядами вибухових речовин на 20-25% при збереженні якості подрібнення гірничої маси.

Ключові слова: вибух, заряд, ініціювання, масив, порода, свердловина.

PROBLEM STATEMENT. The short-delayed blasting (SDB) of the borehole charges currently remains the most effective way to prepare rock for excavation in quarries. Due to the multi-stage blasting, it provides, in comparison with the simultaneous blasting increase in the scale of drilling and blasting operations (DBO), therefore, it can significantly increase the volume of destroyed rock mass [1–7]. In addition, under certain modes of blasting, the quality of grinding the rock mass increases as a result of the interaction of explosive waves in the range positioned borehole charges [8]. It should be noted that the mechanism for the formation of time between detonation by adjacent explosive charges in the group has not yet been fully developed. However, scientific theoretical studies and experimental explosions prove the effectiveness of using it. Therefore, the aim of the work is to justify the need for electronic initiation of borehole explosive charge systems with microsecond short-delayed blasting to form effective modes of interaction of explosion energy flows.

MATERIAL AND RESULTS. According to studies conducted in [8], it is recommended to determine the optimal retardation interval between blasting of groups of borehole explosive charges by the formula

$$\tau_{\text{опт}} = k_c \frac{8\pi \cdot d_c^2 \cdot l_z \cdot \Delta}{H \cdot q \cdot a \cdot \sqrt[4]{c \cdot \rho}}, \quad (1)$$

where k_c is a coefficient depending on the blasting scheme; c is the propagation velocity of longitudinal stress waves in the massif, km/s; ρ is the density of the rock, t/m³; H is the height of the ledge, m; l_z is the length of the borehole charge, m; d_c is the diameter of the charge, m; q – specific consumption of explosive, kg/m³; Δ – explosive loading density in the borehole, kg/m³; a – the distance between the boreholes, m.

The value of the correction coefficient k_c depends on the number of free surfaces of the first and second charges (or rows of charges) in an explosion: three free surfaces – $k_c = 3,3$; four surfaces – $k_c = 1,0$; five free surfaces – $k_c = 0,7$; six – $k_c = 0,5$ [8].

For typical conditions for drilling and blasting operations in quarries, the authors of [9] calculated the optimal blasting intervals between groups of borehole charges. Their values are 25-48 ms. This interval makes it possible to significantly increase the total destruction of the massif during a mass explosion and to control the collapse of the explosion.

When blasting borehole charges in a group, the deceleration interval is recommended to be defined as:

$$\tau = \frac{a}{c_l}, \quad (2)$$

where a is the distance between charges in the explosion row, m; c_l is longitudinal wave propagation velocity in the rock, m/s.

For mining and technological conditions for conducting drilling and blasting operations in Ukrainian quarries, the interval of short-delayed blasting between boreholes in the group should be 800-1400 μ s.

Studies performed in [10] show that, depending on the properties of the mass and the parameters of DBO, the volume of destruction of rock masses with micro-delayed blasting of adjacent charges is greater than with simultaneous blasting by 5-7%.

In accordance with the recommendations on the calculation of the deceleration intervals between groups of borehole charges and the simultaneous explosion of charges in the group, the SDB diagram is proposed, which is shown in fig. 1. Borehole charges on the industrial block of the massif must be staggered. Installation of the blasting scheme is carried out on a short diagonal at an angle that determines the direction of breaking the rock mass. This scheme implements the principle of interaction of energy flows while simultaneously exploding charges in a row [8]. The distance between the borehole charges in the row and between the rows was increased by 0,5 m compared to the standard project for drilling and blasting operations (from 5,0 m to 5,5 m).

Figure 1 – Diagram of blasting of borehole charges

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРИВНИХ РОБІТ НА ДЕННІЙ ПОВЕРХНІ Й У ПІДЗЕМНИХ УМОВАХ

In the “K-MINE” geoinformation system, the action of an explosion on an industrial block was modeled according to the short-delayed blasting scheme of fig. 1. The formation of the stress state of the rock mass and the direction of rock breaking is shown in fig. 2.

Figure 2 – The stress state of the rock mass during short-delayed blasting of charges

If we form a deceleration interval between blasting borehole charges in a group, then there is a difficulty in installing the network, since there are no typical micro-delayed intervals in the steps. Therefore, the installation of such short-delayed blasting requires a search for new ways of forming time intervals for decelerations. From this point of view, electronic blasting is promising in application, in which each borehole explosive charge can be programmed for a separate initiation time [11].

The placement of boreholes on the industrial block of the rock mass with the time of initiation of each charge using electronic blasting is shown in fig. 3. The distance between the rows of borehole charges and between the charges in the rows is 5,5 m. The deceleration interval between the explosion of groups of borehole charges is 25 ms. In the group, the time of detonation of the next charge increases by 1,2 ms. This interval is determined by formula (2) under the condition of explosive destruction of a rock mass composed of magnetite quartzites, the propagation velocity of longitudinal stress waves in which is $c_l = 5125$ m/s.

Figure 3 – Diagram of blasting of borehole charges with an indication of the time of their initiation when using the electronic initiation system

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРИВНИХ РОБІТ НА ДЕННІЙ ПОВЕРХНІ Й У ПІДЗЕМНИХ УМОВАХ

Based on the diagram of blasting shown in fig. 3, the “K-MINE” geoinformation system simulated the effect of an explosion on an industrial block of a massif using an electronic initiation system (fig. 4).

Figure 4 – Simulation of the effect of an explosion on a block of a rock mass using an electronic initiation system

The results of theoretical studies were confirmed by an industrial experiment when blasting industrial blocks in the quarry of the Poltava Mining and Processing Plant [8]. The blast network was switched according to the diagram in fig. 1. The distances between the borehole charges for industrial blocks were 5,0×5,0 m, for experimental blocks – 5,5×5,5 m. Table 1 contains data about the granulometric composition of the crushed rock mass on industrial blocks, and table 2 – on experimental blocks.

Table 1 – The results of crushing of rock masses on industrial blocks

№ of block	Granulometric composition, mm, in percent									The average piece size, mm
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	>800	
1	12,77	22,91	22,69	17,6	11,54	6,60	3,36	1,54	0,99	340
2	11,51	22,13	22,85	18,22	12,15	7,00	3,55	1,60	0,99	347
3	13,02	23,14	22,74	17,51	11,4	6,48	3,27	1,49	0,95	337

Table 2 – The results of crushing of rock masses in experimental blocks

№ of block	Granulometric composition, mm, in percent									The average piece size, mm
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	>800	
1	13,87	23,43	22,42	17,04	11,07	6,34	3,26	1,52	1,05	335
2	12,46	22,98	22,99	17,85	11,61	6,54	3,25	1,44	0,88	339
3	15,95	24,56	22,17	16,15	10,19	5,73	2,92	1,37	0,96	322

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРИВНИХ РОБІТ НА ДЕННІЙ ПОВЕРХНІ Й У ПІДЗЕМНИХ УМОВАХ

The degree of grinding of rock was determined using the K-GRANULES K-MINE module by photoplanimetry. Histograms of the distribution of pieces of rock by fractions on industrial and experimental blocks are shown in fig. 5 and 6.

An analysis of the granulometric composition of the rock mass shows that the size distribution of pieces of crushed rock is approximately the same both on industrial blocks and on experimental ones (the average diameter of a piece is more than 3%). However, at the same time, on the experimental blocks, the distance between the borehole charges is 21% higher in comparison to the industrial blocks [8].

Figure 5 – A histogram of the distribution of pieces of blasted rock mass by fractions on an industrial block

Figure 6 – A histogram of the distribution of pieces of blasted rock mass by fractions on an experimental block

CONCLUSION. The research results show that the destruction of massifs of industrial blocks according to the schemes for installing a network of borehole charges with combined blasting (slowing down charges in a row and between rows) is more

effective than using traditional SDB (see fig. 4). Therefore, the electronic initiation of borehole charges, as a means of implementing this blasting scheme, is recommended for implementation in mining enterprises conducting blasting operations. It also facilitates the control of seismic characteristics of the explosion.

REFERENCES

1. Kutuzov, B. N. (2007), *Metodyi vedeniya vzryivnyih rabot. Chast 1. Razrushenie gorniyh porod vzryivom*, [Blasting techniques. Part 1. Explosion of rocks], Gornaya kniga, Moscow, Russia.
2. Boiko, V., Remez, D. (2014), "Mathematical simulation of millisecond-delay blasting for carry out spectrum of fluctuations", *Suchasny resursoenergozberigauchi tehnolohii hirnychoho vyrobnytstva*. Kremenchuk Mikhaïlo Ostrohradskyi National University, vol. 1, no. 13, pp. 33–40.
3. Zhu, Z. et al. (2008), "Numerical investigation of blast-induced damage in cylindrical rocks", *International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 45, pp. 111–121.
4. Anisimov, V. N., Kuznetsov, V. A., Ryapolov, A. N. (2003), "Vzryivnaya rudo-podgotovka slozhno-strukturnykh massivov zhelezistykh kvartsitov", *Problemy vzryivnogo dela*, pp. 72–83.
5. Norov, Yu., Arapbaev, N. (2016), "Explosive technology design of rock mass weakening", *Suchasny resursoenergozberigauchi tehnolohii hirnychoho vyrobnytstva*. Kremenchuk Mikhaïlo Ostrohradskyi National University, vol. 1, no. 16, pp. 48–53.
6. Holmberg, R. (2003), "Explosives and blasting technique", *Proceedings of EFEE second world conference on explosives and blasting technique*, Prague, Lisse, Neverlands, September 2003, 632 p.
7. Lapshov, A. A., Ermolaev, A. I., Monahov, E. D. (2010), "Obosnovanie optimalnykh dlya drobleniya gorniyh porod intervalov zamedleniya pri mnogoryadnom korotkozamedlennom vzryivanii", *Materialy Uralskoy gornopromyshlennoy dekadyi*, pp. 201–203.
8. Frolov, O. O., Kriuchkov, A. I., Kosenko, T. V. (2019), *Keruvannia enerhetychnymy potokamy pry vybukhovomu ruinuvanni hirskykh pored na karierakh: monohrafiia*, KPI im. Ihorïa Sikorskoho, Kyiv, Ukraine.
9. Frolov, O. O., Kuliapina, A. V. (2017), "Vstanovlennia efektyvnykh rezhymiv spovilnenoho pidryvannia pry ruinuvanni skelnykh pored na kar'ierakh", *Visnyk ZhDTU*, vol. 2, № 80, pp. 207–213.
10. Kuliapina, A. V., Frolov, A. A. (2017), "Opredelenie effektivnykh rezhimov korotkozamedlennoho vzryivaniya pri razrushenii skalnykh gorniyh massivov na karerakh", *Sotsialno-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki*. Materialy 13-y Mezhdunarodnoy konferentsii [Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy: Materials of the 13th International Conference], Tula, November 02-03, 2014. T. 1. pp. 100–108.
11. Nazarenko, V. V. (2019), "Vprovadzhennia elektronnoho sposobu pidryvannia pry provedenni promyslovykh vybukhiv", *Perspektyvy rozvytku budivelnnykh*

tekhnolohii. Materialy 13-y mizhnarodnoy naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv [Prospects for the development of building technologies: materials of the 13th international scientific-practical conference of young scientists, graduate students and students], Dnipropetrovsk, April 18–19, 2019, pp. 53–56.

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ
СИСТЕМ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ
ПРИ КОРОТКОЗАМЕДЛЕННОМ ВЗРЫВАНИИ НА КАРЬЕРАХ**

А. А. Фролов, Т.В. Косенко

НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ул. Борщаговская, 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Представлены результаты исследований по обоснованию применения электронного инициирования зарядов взрывчатых веществ при комбинированном короткозамедленном взрывании на карьерах. Отмечено, что при определенных режимах взрывания повышается качество измельчения горного массива в результате взаимодействия энергетических потоков при взрыве смежных скважинных зарядов. Доказана технологическая эффективность данной схемы взрывания, при которой скважинные заряды замедляются как в ряду, так и между рядами. В геоинформационной системе «K-MINE» выполнено моделирование действия взрыва на промышленном блоке при комбинированной схеме взрывания скважинных зарядов взрывчатых веществ. Для реализации схем комбинированного короткозамедленного взрывания рекомендовано к внедрению электронное взрывание скважинных зарядов как наиболее целесообразное и технологически несложное, при котором каждый заряд программируется на индивидуальное время инициирования.

Ключевые слова: взрыв, заряд, инициирование, массив, порода, скважина, карьер.

Стаття надійшла 29.11.2019.