

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОУСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА НА ПРЕДЕЛЬНОМ КОНТУРЕ КАРЬЕРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАОТКОСНЫХ РАБОТ

ЖАРИКОВ С. Н.

В статье изложен принцип разработки специальной технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьера, который заключается в изучении воздействия взрыва на законтурный массив, установлении закономерностей протекания в массиве волновых процессов, определении взаимодействия зарядов контурной ленты в зависимости от прочностных характеристик массива, проведении опытно-промышленных испытаний способов заоткоски, определении этапности подхода технологических взрывов к охраняемому участку, а также установлении критериев оценки эффективности производства буровзрывных работ. Изучение распространения сейсмических волн в горном массиве при динамическом воздействии взрывов и инициировании образования волн напряжений позволяет установить параметры разрушающего воздействия технологических взрывов выемочных блоков. Вместе с определением сейсмостойчивости горных пород выделяют зоны деформаций от взрывов, что позволяет выбрать наиболее щадящие приемы производства буровзрывных работ и сохранить устойчивость откосов. В настоящее время и в ближайшей перспективе изучение закономерностей протекания волновых процессов в массиве горных пород под воздействием взрывных работ актуально и будет востребовано, так как определяет безопасность ведения горных работ в целом и ведение работ на значительной глубине в частности.

Ключевые слова: буровзрывные работы; специальная технология БВР; динамическое воздействие; контурное взрывание; предельный контур карьера.

Увеличение угла откоса бортов карьера ведет к снижению объемов разноски и повышает экономическую эффективность разработки месторождения. Однако при этом повышается риск обрушения откосных сооружений в карьере в результате геодинамических движений, связанных с горным давлением и влиянием кратковременных импульсных нагрузок, вызванных ведением взрывных работ. Оценка устойчивого состояния откосного сооружения при определенной величине угла основывается на измерениях сдвигения массива в том или ином направлении в рамках достаточно продолжительных периодов наблюдений, при этом короткопериодные деформации, приводящие к локальным межблочным подвижкам [1], при обосновании устойчивых углов не учитываются. Поэтому недостаточно аккуратное ведение буровзрывных работ (БВР) вблизи откосных сооружений может вызвать нарушение их устойчивости и привести к катастрофическим оползневым явлениям.

В последнее время горные предприятия проявляют особый интерес к заоткосным работам при подходе буровзрывных работ к предельному контуру карьера. Очевидно, что увеличение затрат на БВР в приконтурной зоне при повышении

качества исполнения и контроля ведет к повышению безопасности горных работ, сохранению устойчивого состояния откосов, а следовательно, повышению экономической эффективности разработки месторождения в целом, потому что ликвидация, например, оползня связана с частичной остановкой добычных работ, а в некоторых случаях – с полной остановкой и соответствующим ущербом, иногда с человеческими жертвами. Таким образом, повышение безопасности на опасном производственном объекте – это не просто статья затрат, а весомый вклад в развитие предприятия, который существенно определяет экономическую эффективность добычи будущих периодов.

Институт горного дела УрО РАН выполняет научно-исследовательские работы по внедрению специальной технологии БВР на предельных контурах карьеров. Для снижения динамического воздействия технологических взрывов на устойчивость откосных сооружений карьера проводится комплекс исследований сейсмической устойчивости горного массива. По результатам исследований сейсмостойчивости горных пород разрабатывается специальная технология производства БВР на предельном контуре карьера. Технологические приемы проходят промышленные испытания в рамках соответствующей программы, которая утверждается руководством горного предприятия, включает этапы выполнения, перечень необходимых ресурсов, порядок контроля за выполнением пунктов программы. После реализации программы и опытно-промышленных испытаний полученные результаты анализируются и составляется внутренний нормативный документ предприятия по производству БВР на предельном контуре карьера (технологический регламент). Ожидаемые результаты от внедрения – это обеспечение минимального влияния буровзрывных работ на устойчивость бортов карьера, повышение безопасности при производстве работ под высокими уступами, снижение себестоимости производства товарной продукции. Основным конкурентным преимуществом данной разработки является возможность ее применения при увеличении интенсивности горных работ. При этом за счет регламентирования производства работ повышается промышленная безопасность на предельных контурах карьера. Область применения – карьеры с цикличной технологией добычи, разрабатывающие крутопадающие месторождения полезных ископаемых.

В рамках таких НИР проводятся исследования сейсмического действия взрывов с целью, во-первых, установить соответствие фактических колебаний и расчетных допустимых колебаний, определенных для исследуемых грунтов на основании данных геологической документации. Во-вторых, по деформационным проявлениям от технологических взрывов в приближении устанавливаются свойства грунтов и определяются примерные зоны развития трещин, межблочных подвижек и остаточных деформаций. Указанная информация служит критерием выбора тех или иных параметров БВР для включения в программу опытно-промышленных испытаний. Также в зависимости от свойств грунтов и свойств применяемых ВВ определяются параметры зарядов контурных лент при осуществлении экранирования.

Допустимый динамический предел прочности находится в соответствии с уровнем сейсмостойчивости горного массива:

$$[\sigma_{ст}] + [\sigma_{дин}] \leq \sigma_{дин},$$

где $[\sigma_{ст}]$ – статическое напряжение в массиве, окружающем выработку; $[\sigma_{дин}]$ – динамическое напряжение в массиве (около выработки); $\sigma_{дин}$ – допустимый динамический предел прочности породы.

Согласно [2], допустимая скорость смещения массива, м/с, определяется по выражению:

$$v_d = \frac{\sigma_{\text{дин}}}{\gamma C} 2604,1,$$

где γ – плотность пород, т/м³; C – скорость звука в породе, м/с.

Скорость сейсмических колебаний, м/с, в зависимости от массы ВВ в ступени и расстояния от взрыва до охраняемого объекта можно определить согласно следующему выражению [3, 4]:

$$v = K \sqrt{Q/R^3},$$

где Q – масса одновременно взрывааемых зарядов (масса ВВ в ступени замедления), кг; R – расстояние до объекта, м; K – коэффициент, зависящий от грунтовых условий (скальные, полускальные грунты $K = 200$ – 300 ; песчано-глинистые $K = 300$ – 450 ; рыхлые, обводненные и насыпные грунты $K = 450$ – 600) (*Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. 12 с.*)

Полученные расчетным путем данные сравниваются с фактическими замерами сейсмических колебаний от технологических взрывов, и устанавливается степень соответствия значений. Схема оценки сейсмического действия технологических взрывов показана на рис. 1.

Для повышения точности определения зоны влияния взрыва на состояние массива следует уточнять скорость прохождения по массиву продольных и поперечных волн. Особенно это необходимо при значительном превышении фактических колебаний над расчетными. Согласно значениям прохождения продольных и поперечных волн в грунте определяются зоны распространения деформационных процессов [3]:

$$R_{\text{уп}} = \frac{C_p}{10} \sqrt[3]{Q}; \quad R_{\text{сд}} = \frac{\sqrt{C_s}}{10} \sqrt[3]{Q}; \quad R_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \sqrt[3]{Q},$$

где $R_{\text{уп}}$ – радиус упругой зоны, за пределами которой исключено формирование остаточных деформаций среды, м; $R_{\text{сд}}$ – радиус зоны наибольших сдвиговых деформаций, м; $R_{\text{тр}}$ – радиус зоны трещинообразования, м; C_p – скорость продольной волны, м/с; C_s – скорость поперечной волны, м/с.

Таким образом, сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет вести наблюдение за сейсмоустойчивостью горного массива при ведении взрывных работ и, соответственно, определять в тех или иных условиях степень воздействия технологических взрывов на борта карьера.

Расчетная скорость продольных волн в породах, м/с, может быть определена согласно [5] по выражению:

$$C_p = \sqrt{\frac{E_{\text{дин}}}{\gamma} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1-\nu)}},$$

где $E_{\text{дин}}$ – динамический модуль упругости, Па; γ – плотность породы, кг/м³; ν – коэффициент Пуассона, ед.

Динамический модуль упругости при исследовании образцов, как правило, больше статического в 2–4 раза. В массиве картина иная. Сопротивление массива динамическим нагрузкам меньше, чем у слагающих его пород, а значит, соотно-

шение динамического и статического модуля упругости может быть выражено согласно [6] следующей зависимостью:

$$E_{\text{дин}} = 1,15E_{\text{ст}} + 0,5 \cdot 10^5,$$

где $E_{\text{ст}}$ – статический модуль упругости, Па.



Рис. 1. Схема оценки сейсмического действия технологических взрывов

Свойства пород в естественном залегании можно определить косвенным способом на основе определенных характеристик волновых процессов. Как отмечалось ранее, скорость продольных волн и скорость колебаний связаны с прочностью горных пород. Следовательно, на основе измерений можно вычислить значения пределов прочности на растяжение в массиве, МПа, тем самым уточнив коэффициент структурного ослабления:

$$\sigma_p = \frac{\gamma C_p}{2604,1k},$$

где k – поправочный коэффициент, $k = 1,1-1,3$.

Скорость продольных волн, м/с, определяется по следующим выражениям:

$$C_p = \sqrt{\frac{56,25 \cdot 10^8 Qg [1 + (1 - 2\nu)\epsilon]^8}{\sqrt[3]{\gamma R^3 \left(37,5 \left(1 - \frac{4}{3} k_{sp}^2 \right) \left[(1 + (1 - 2\nu)\epsilon)^{8/3} - 1 \right] \right)^2}},$$

$$C_p = \left\{ \frac{7,5 \cdot 10^4 \sqrt{2g} \cdot 10^3 Q^{0,75} [1 + (1 - 2\nu)\epsilon]^4}{\sqrt{d_{\text{СКВ}}} \gamma^{0,75} R^{2,375} 37,5 \left(1 - \frac{4}{3} k_{sp}^2 \right) \left[(1 + (1 - 2\nu)\epsilon)^{8/3} - 1 \right]} \right\}^{1/1,75},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ε – суммарная деформация; k_{sp} – коэффициент, характеризующий соотношение поперечной и продольной волн для горной породы; R – расстояние от края блока до точки измерения скорости колебаний, м ; $d_{скв}$ – диаметр скважины, мм .

Согласно [7], соотношение поперечной и продольной волн можно определить по следующему выражению:

$$k_{sp} = \frac{C_s}{C_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$$

Таким образом, внедрение специальной технологии БВР на заоткосных работах сопровождается изучением распространения волновых процессов в горных породах разрабатываемого месторождения, что в результате отражается на выборе соответствующих параметров. Важным элементом таких исследований является уточнение свойств грунта [8] под кратковременными динамическими нагрузками.

Представленные методические приемы позволяют предварительно определить расчетную сейсмоустойчивость массива, сравнить с данными экспериментальных измерений, по которым в то же время можно уточнить состояние горного массива и определить зоны возможных нарушений, что позволяет иметь наиболее полную картину распространения волновых процессов в конкретных горных породах и, соответственно, рационально управлять ими. В первую очередь это касается производства буровзрывных работ на заоткосных работах, а также при последующем производстве технологических взрывов.

Исследования выполнены в рамках Госзадания 007-01398-17-00, а также при дополнительном привлечении хоздоговорных средств и финансирования по конкурсу проекту № 15-11-57.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Князев Д. Ю., Жариков С. Н. Изучение сейсмического действия взрывов в подземных горных выработках // Взрывное дело. 2014. № 112/69. С. 251–261.
2. Жариков С. Н., Шеменев В. Г. О влиянии взрывных работ на устойчивость бортов карьеров // Изв. вузов. Горный журнал. 2013. № 2. С. 80–83.
3. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. 271 с.
4. Жариков С. Н., Шеменев В. Г. О влиянии взрывных работ на напряженное состояние горного массива и геодинамические явления // Изв. вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 90–97.
5. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984. 359 с.
6. Юревич Г. Г., Беляков В. Д., Севастьянов Б. Н. Охрана горных выработок от воздействия взрывов. М.: Недра, 1972. 136 с.
7. Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Шитов Ю. А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2008. 224 с.
8. Жариков С. Н., Шеменев В. Г., Кутуев В. А. Способы уточнения свойств горных пород при производстве буровзрывных работ // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 1. С. 74–80.

Поступила в редакцию 3 июля 2017 года

THE STUDY OF SEISMIC SUSTAINABILITY OF ROCK MASSIF AT THE LIMITING CONTOUR OF AN OPEN PIT TO PRODUCE SLOPE WORKS

Zharikov S. N. – Institute of Mining, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation.
E-mail: 333vista@mail.ru

The article describes the principle of developing special technology for drilling and blasting at the open pit limiting contour, which consists in the study of the explosion impact on the marginal massif, the establishment of regularities the array

of wave processes, determining the interaction of the charge tape contour depending on the strength characteristics of an open pit, conducting pilot tests of the methods of setting the limit position, the determination of the phasing of the approach of technological explosions to the protected area, as well as defining criteria to assess the efficiency of drilling and blasting operations. The study of seismic waves propagation in rock mass under the dynamic influence of explosions and the initiation of strain waves generation makes it possible to establish the parameters of devastating effect of technological explosions of mining blocks. Together with the determination of seismic sustainability of rocks, the zones of deformation caused by the explosions are distinguished, which makes it possible to choose the most sparing techniques of drilling and blasting and keep the slopes sustainability. At present time and in the short term the study of the regularities of wave processes within the rock mass under the influence of blasting operations is up to date and will be required, because it determines the safety of mine works as a whole and work production at significant depth in particular.

Key words: drilling and blasting operations; special blasting technology of drilling and blasting; dynamic effect; contour blasting; open pit limiting contour.

REFERENCES

1. Kniazev D. Iu., Zharikov S. N. [The study of seismic activity of explosions in underground workings]. *Vzryvnoe delo – Explosion Technology*, 2014, no. 112/69, pp. 251–261. (In Russ.)
 2. Zharikov S. N., Shemenev V. G. [On the effect of blasting on stability of pit barriers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 2, pp. 80–83. (In Russ.)
 3. Mosinets V. N. *Drobiashchee i seismicheskoe deistvie vzryva v gornykh porodakh* [Crushing and seismic effect of an explosion in rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 271 p.
 4. Zharikov S. N., Shemenev V. G. [On the influence of blasting on the stress state of rock mass and geodynamic phenomena]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 3, pp. 90–97. (In Russ.)
 5. Rzhavskii V. V., Novik G. Ia. *Osnovy fiziki gornykh porod* [The fundamentals of rock physics]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 359 p.
 6. Iurevich G. G., Beliakov V. D., Sevast'ianov B. N. *Okhrana gornykh vyrabotok ot vozdeistviia vzryvov* [Mine workings protection from the explosions effect]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 136 p.
 7. Fokin V. A., Tarasov G. E., Togunov M. B., Danilkin A. A., Shitov Iu. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii burovzryvnykh rabot na predel'nom konture kar'erov* [The development of the technology of drilling and blasting operations at the limiting contour of open pit]. Apatity, KSC RAS Publ., 2008. 224 p.
 8. Zharikov S. N., Shemenev V. G., Kutuev V. A. [The methods of specifying the properties of rocks under the production of drilling and blasting operations]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii – Sustainable Development of Mountain Territories*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 74–80. (In Russ.)
-