

В.Н. Камянский

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ*

Рассмотрено влияние ориентации отбиваемого слоя горной породы на состояние приконтурного массива при производстве взрывных работ на карьерах. Особое внимание уделено исследованию характера распределения напряжений и развития трещин в приконтурной части массива от взрыва скважинных зарядов, на основе чего обоснованы наиболее предпочтительные направления отбойки относительно законтурного массива, позволяющие минимизировать законтурные нарушения.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, разрушение горных пород, взрыв, взрывчатое вещество, карьер.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-228-234

Введение

При ведении взрывных работ на карьерах наиболее существенным отрицательным эффектом взрыва является нарушение и ослабление массива горных пород за контуром взрываемого участка. Сейсмозрывные нагрузки на массив пород не однозначно проявляются в различных зонах действия взрыва. В пределах ближней зоны действия взрывов происходит изменение состояния и свойств массива, в частности, происходит раскрытие первоначально сомкнутых естественных трещин, нарушение связности по поверхностям структурных неоднородностей, наблюдается смещение структурных блоков относительно друг друга.

В результате этих явлений прочность скального массива и устойчивость откосов в нем существенно снижаются. При этом зона влияния динамических воздействий от взрывных нагрузок может достигать до

30–40 м и более. В пределах этой зоны выделяются дополнительно три зоны: зона трещинообразования, граница которой определяется радиусом зоны трещинообразования от взрыва скважин последнего ряда; зона нарушения сплошности пород, с расстоянием от скважин до 20–25 м, и далее зона микродеформаций.

Минимизация законтурных разрушений при производстве взрывных работ на карьерах может быть достигнута путем выбора определенной схемы коммутации взрывной сети, обеспечивающей необходимое направление отбойки.

Поскольку обустройство взрывных блоков на карьерах осуществляется по квадратной либо шахматной сетке, то ряды скважин могут быть ориентированы по отношению к вмещающему массиву различным образом. Соответственно угол между массивом и отбиваемым слоем может меняться в широких пределах.

* Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 17-77-20055.

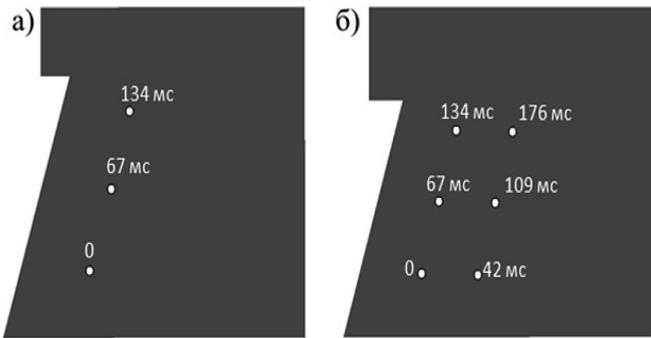


Рис. 1. Исходная геометрия модели с углом сопряжения отбиваемого слоя с вмещающим массивом 75° : с одним рядом скважин (а); с двумя рядами (б)

Для учета влияния направления отбойки на законтурные нарушения массива было выполнено математическое моделирование в программном продукте Ansys Autodyn, предназначенного для решения задач нелинейной динамики твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия [1].

Постановка задачи исследований

Для решения данной задачи разработана модель взрывания скважинных зарядов в двухмерной постановке. Геометрия моделей представляет собой вмещающий массив с частью взрывного блока с одним и двумя рядами скважин диаметром 250 мм, расположенных по квадратной и шахматной сетке 5×6 м (рис. 1). Интервал замедления между скважинными зарядами в ряду — 67 мс, между рядами — 42 мс. В модели рассматриваются углы сопряжения отбиваемого слоя с вмещающим массивом 75° , 90° и 105° . В качестве взрывчатого вещества (ВВ) выбрано ANFO ($\rho = 930$ кг/м³; $D = 4160$ м/с; $Q = 2500$ МДж/м³; $P = 5,15$ ГПа). Тип горной породы — апатит-нефелиновая руда ($\rho = 3000$ кг/м³; $V_p = 4200$ м/с; $\sigma_{сж} = 160$ МПа; $\sigma_p = 16$ МПа; $\nu = 0,25$; $G = 25$ ГПа).

Численные значения параметров волн напряжений снимались в точках, расположенных на расстоянии 5 м от крайней скважины в сторону массива. На рис. 1

приведен пример исходной геометрии модели с углом наклона отбиваемого слоя 75° .

Основные этапы моделирования включают: построение геометрии, дискретизацию геометрии расчетной сеткой, задание начальных и граничных условий.

В качестве уравнения состояния взрывчатого вещества выбрано уравнение Джонса-Уилкинса-Ли (JWL), описывающее поведение продуктов детонации [2–4].

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (1)$$

где P — гидростатическое давление, Па; $V = v/v_0$ — относительный удельный объем; $E = e/v_0$ — удельная внутренняя энергия, Дж/м³; $p_0 = 1/v_0$ — начальная плотность ВВ, кг/м³; A, B, R_1, R_2, w — эмпирические постоянные. Для ANFO: $A = 49,46$ ГПа; $B = 1,89$ ГПа; $R_1 = 3,91$; $R_2 = 1,12$; $w = 0,33$.

В качестве уравнения состояния горной породы выбрано уравнение состояния пористых сред, дополненное уравнением ударной адиабаты

$$U_s = C_0 + S_1 U_p + S_2 U_p^2, \quad (2)$$

где C_0 — скорость звука в породе, м/с; U_p — массовая скорость, м/с; S_1, S_2 — эмпирические константы. $S_1 = 1,5$; $S_2 = 0$.

Прочность горной породы описывается RHT – моделью прочности (Riedel-Hiermaier-Thoma). Данная модель описывает поведение упругопластического тела с упрочнением [5, 6].

Для того чтобы моделируемый процесс разрушения отражал реальную картину, необходим учет естественной неоднородности материала модели, что достигается введением вероятностного закона распределения начальных отклонений прочностных свойств в рассматриваемом объеме. В данном случае процесс разрушения приобретает вероятностный характер, что наиболее полно соответствует реальному процессу разрушения. В качестве функции распределения вероятности используется закон распределения Мотта для фрагментации твердых сред, представленный в виде (3):

$$P(\varepsilon) = 1 - e^{-\frac{C}{\gamma}(e^{\gamma\varepsilon} - 1)}, \quad (3)$$

где P – вероятность возникновения трещины; ε – деформация; γ – дисперсия; C – постоянная материала [7].

Массив моделируется путем привязки геометрии к лагранжевому решателю, а взрывчатое вещество, продукты дето-

нации и окружающая среда посредством многокомпонентного эйлерового решателя. Данный подход получил широкое распространение при решении подобного рода задач [8–12].

При решении задач взрыва элементы лагранжевой сетки вследствие действия высоких напряжений могут сильно деформироваться, что ведет к значительному сокращению эффективности вычислений. Поэтому в данном численном эксперименте в момент, когда относительная деформация элемента превышает 100% – элемент удаляется из расчетной области, а действующие на него силы перераспределяются на соседние элементы. Включение алгоритма «эрозии элементов» вносит в расчетную модель незначительное увеличение относительной ошибки, но в тоже время, позволяет сохранить шаг решения по времени на оптимальном уровне и более реалистично моделировать процесс хрупкого разрушения.

Результаты моделирования

На первом этапе исследований рассматривался взрыв одного ряда скважин

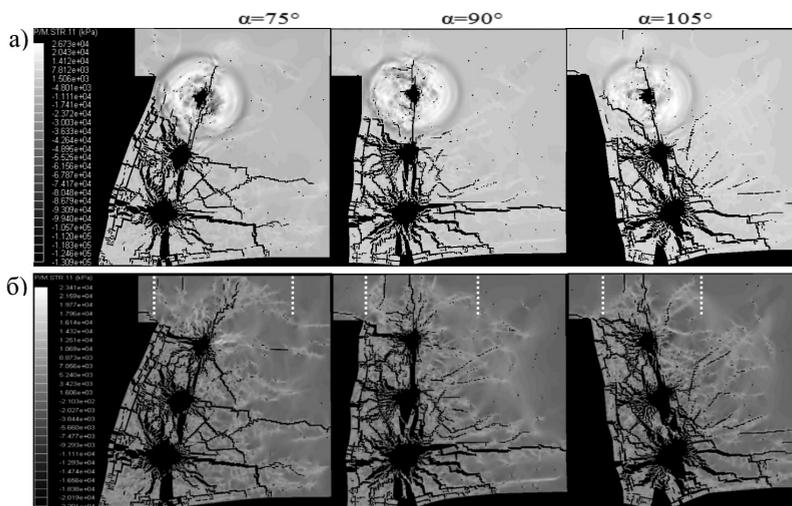


Рис. 2. Развитие трещин и распределение поля напряжений при различной ориентировке отбиваемого слоя относительно законтурного массива: на момент времени 1 мс после взрыва последнего заряда (а); на момент времени 200 мс (б)

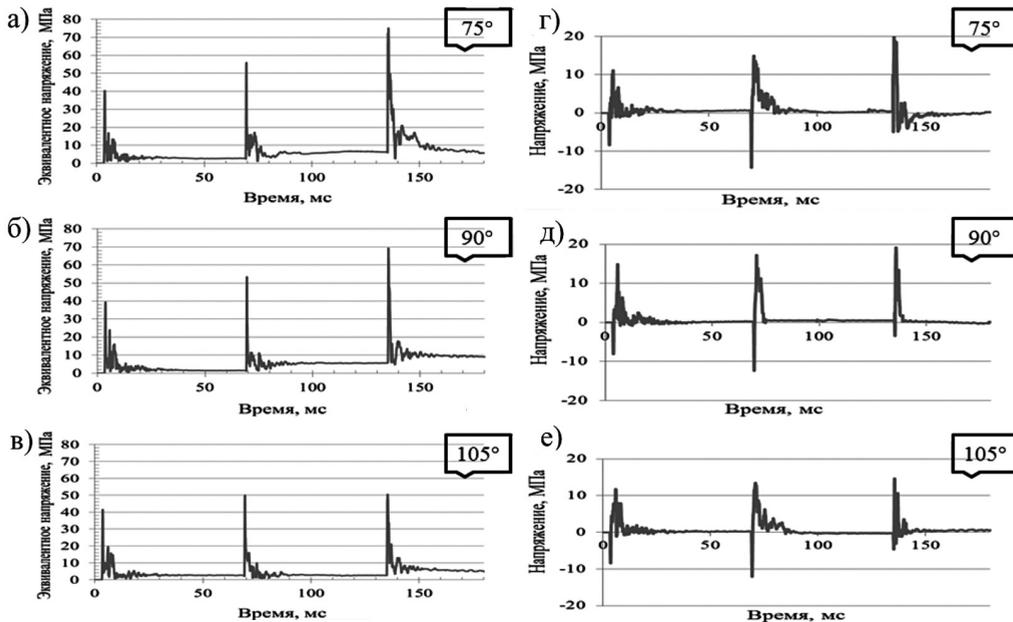


Рис. 3. Радиальные (а, б, в) и тангенциальные (г, д, е) напряжения в контрольных точках измерения при углах 75°, 90° и 105°

с различной пространственной ориентацией отбиваемого слоя относительно законтурного массива. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Из анализа распределения полей напряжений следует, что размер зоны повышенных тангенциальных напряжений в приконтурной области составляет приблизительно 105, 85 и 65 радиусов зарядов при углах 75°, 90° и 105° соответственно.

Уровень действующих радиальных и тангенциальных напряжений в кон-

трольных точках измерения от взрывов каждого заряда представлен на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что радиальные напряжения от взрыва крайней скважины составляют 75, 69 и 51 МПа, а тангенциальные 20, 19 и 15 МПа соответственно при углах 75°, 90° и 105°.

На втором этапе моделирования рассмотрен взрыв двух рядов скважин с указанными выше замедлениями (рис. 4).

Картина распределения поля напряжений показывает, что при взрыве двух рядов напряженное состояние изменя-

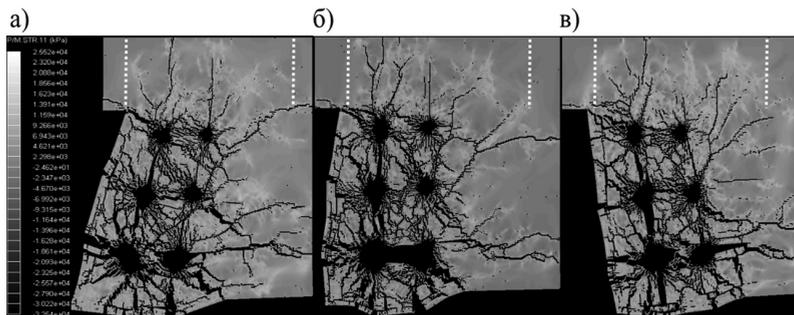


Рис. 4. Распределение поля напряжений при взрыве двух рядов скважин, расположенных под углом к массиву: 75° (а); 90° (б); 105° (в)

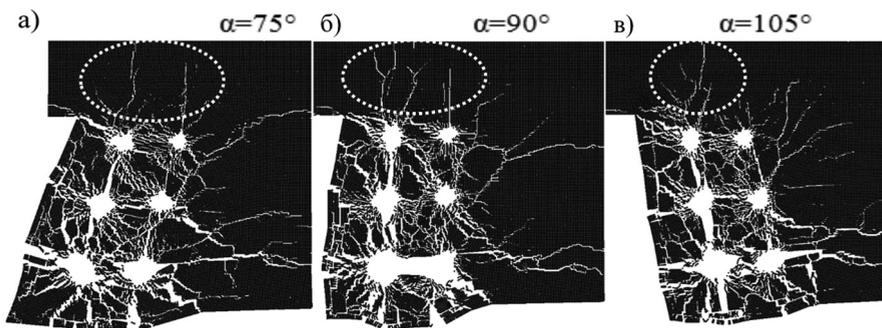


Рис. 5. Развитие трещин при взрыве всех зарядов на момент времени 200 мс при различной ориентировки отбиваемого слоя относительно законтурного массива

ется. При угле 75° зона повышенных напряжений увеличивается и имеет размеры 160 радиусов зарядов, при углах 90° и 105° – 150 и 130 радиусов соответственно.

Уровень действующих радиальных и тангенциальных напряжений в контрольных точках измерения от взрывов каждого заряда представлен на рис. 6.

При моделировании получено, что радиальные напряжения от взрыва край-

ней скважины составляют для всех вариантов ориентировки около 80 МПа, а тангенциальные для углов 75° и 90° имеют максимум 18 МПа, а при 105° – 15 МПа.

Из анализа динамики разрушения (рис. 5) следует, что интенсивность трещинообразования также изменяется. Максимальное нарушение сплошности приконтурного массива наблюдается при углах 75° и 90° , а минимальное – при 105° .

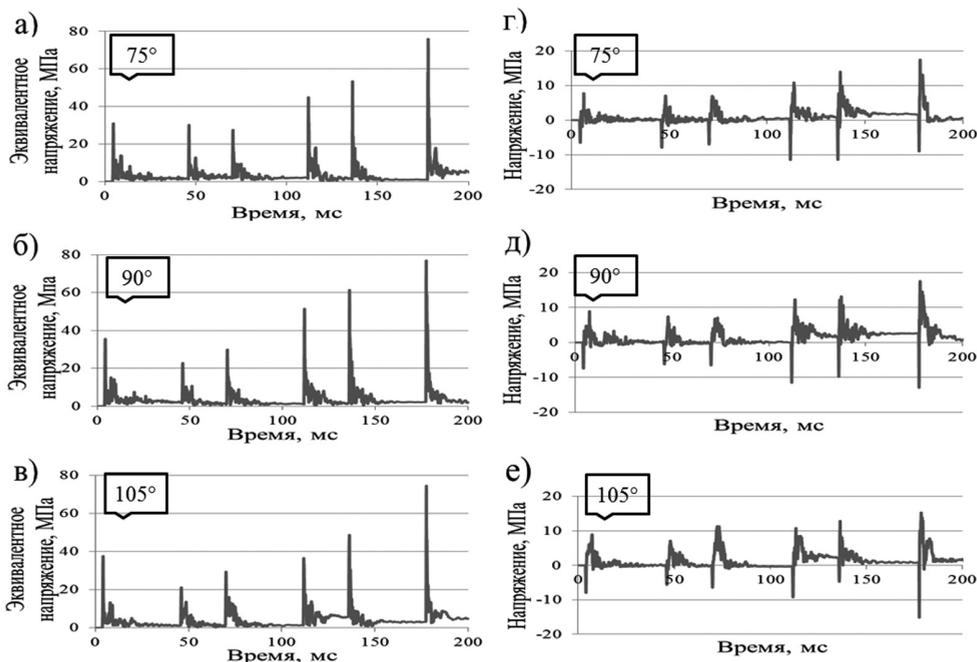


Рис. 6. Радиальные (а, б, в) и тангенциальные (г, д, е) напряжения от взрыва скважинных зарядов в контрольных точках измерения

Выводы

По результатам проведенного вычислительного эксперимента установлено, что пространственное положение отбиваемого слоя горной породы оказывает существенное влияние на напряженное состояние и степень нарушенности приконтурного массива.

При рассмотрении взрыва скважинных зарядов в одном ряду выявлено, что при увеличении угла сопряжения взрывных диагоналей с вмещающим массивом с 75° до 105° , размер области действующих повышенных тангенциальных напряжений уменьшается на 60%. Численные значения напряжений, при этом уменьшаются на величину до 40%. При

взрыве скважинных зарядов в смежных рядах размер области уменьшается на 30%, а численные значения напряжений уменьшаются на 25%.

Из представленных данных следует, что наименее сейсмоопасной является схема взрывания с расположением рядов скважин под углом 105° к борту уступа, взрывание второго и последующих рядов приводит к увеличению зоны трещинообразования, что не учитывалось ранее. С целью минимизации разрушений в приконтурной области массива коммутацию взрывной сети предпочтительней проводить таким образом, чтобы угол между отбиваемым слоем и вмещающим массивом составлял 90° и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ansys inc. Autodyn. Explicit software for non-linear dynamics: theory manual. Ansys inc., 2005. — 235 p.
2. Lee E. L., Hornig H. C., Kury J. W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCRL-50422, Livermore, California, 1968, 41 p.
3. Elek P. M. et al. Determination of detonation products equation of state from cylinder test: analytical model and numerical analysis // Thermal science. 2015. Vol. 19, no. 1, pp. 35–48.
4. Sanchidrian J. A. et. al. Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data // Central European journal of energetic materials. 2015. Vol. 12, no. 2, pp. 177–194.
5. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes. Proceeding of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures. Berlin, 1999. Pp. 315–322.
6. Yun S. H., Park T. Multi-physics blast analysis of reinforced high strength concrete // Journal of civil engineering. 2013. Vol. 17, no. 7, pp. 777–788.
7. Mott N. F. A theory of the fragmentation of shells and bombs. Ministry of Supply AC4035, 1963.
8. Moxnes J. F. et. al. Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding warhead casings by using different numerical codes and solution techniques // Defence technology. 2014. Vol. 10, pp. 161–176.
9. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles // Scientific Technical Review. 2013. Vol. 63, no. 2, pp. 47–57.
10. Wang G., Zhang S. Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading // Engineering failure analysis. 2014. Vol. 39, pp. 72–91.
11. De A. et al. Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels // Geotextiles and Geomembranes. 2016. Vol. 44, pp. 1–12.
12. Deng X. F. et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses // Tunnelling and Underground Space Technology. 2014. Vol. 43, pp. 88–100. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Камянский Виктор Николаевич — аспирант, инженер,
e-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru, Горный институт Кольского научного центра РАН.

V.N. Kamyansky

INVESTIGATION OF ADJACENT ROCK MASS DURING BLASTING IN OPEN PIT MINES

The article presents results of theoretical research that carried out to determine an influence of orientation the blasted layer of rock mass to the state of marginal area of rock at blasting on open-pit mines. The special consideration is given to study of nature of the stress distribution and cracks propagation at marginal area in rock mass, based on obtained results the most preferable orientation of blasted layer of rock mass has been established.

Key words: numerical simulation, finite element method, rock failure, blast, explosive, open-pit mine.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-228-234

AUTHOR

Kamyansky V.N., Graduate Student, Engineer,
e-mail: kamyanski@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute of Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been supported by the Russian Science Foundation, Project No. 17-77-20055.

REFERENCES

1. Ansys inc. Autodyn. *Explicit software for non-linear dynamics: theory manual*. Ansys inc., 2005, 235 p.
2. Lee E. L., Hornig H. C., Kury J. W. *Adiabatic expansion of high explosive detonation products*, UCRL-50422, Livermore, California, 1968, 41 p.
3. Elek P. M. et al. Determination of detonation products equation of state from cylinder test: analytical model and numerical analysis. *Thermal science*. 2015. Vol. 19, no. 1, pp. 35–48.
4. Sanchidrian J. A. Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data. *Central European journal of energetic materials*. 2015. Vol. 12, no. 2, pp. 177–194.
5. Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500. *Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes. Proceeding of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures*. Berlin, 1999, pp. 315–322.
6. Yun S. H., Park T. Multi-physics blast analysis of reinforced high strength concrete. *Journal of civil engineering*. 2013. Vol. 17, no. 7, pp. 777–788.
7. Mott N. F. *A theory of the fragmentation of shells and bombs*. Ministry of Supply AC4035, 1963.
8. Moxnes J. F. et al. Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding war-head casings by using different numerical codes and solution techniques. *Defence technology*. 2014. Vol. 10, pp. 161–176.
9. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles. *Scientific Technical Review*. 2013. Vol. 63, no. 2, pp. 47–57.
10. Wang G., Zhang S. Damage prediction of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading. *Engineering failure analysis*. 2014. Vol. 39, pp. 72–91.
11. De A. et al. Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. Vol. 44, pp. 1–12.
12. Deng X. F. et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. Vol. 43, pp. 88–100.