

ОЦЕНКА СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК НА ЗАКОНТУРНЫЙ МАССИВ ПРИ РАЗДЕЛКЕ ОТРЕЗНОЙ ЩЕЛИ

Аннотация. На основе численного моделирования изучен процесс формирования отрезной щели при взрывании контурных зарядов с воздушным и водяным радиальным зазором. Исследовано поле действующих радиальных и тангенциальных напряжений в ближней зоне взрыва. Дана оценка экранирующего действия сформированной отрезной щели при взрывании зарядов приконтурного блока. Показано, что разделка отрезной щели является высокоэффективным методом снижения сейсмозрывных нагрузок на законтурный массив.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, взрыв, контурное взрывание, предварительное щелеобразование.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-181-188

Введение

В горнодобывающей отрасли взрывные работы являются основным технологическим процессом, от качества выполнения которого, зависят все последующие процессы добычи и переработки полезного ископаемого.

На крупных горных предприятиях, обрабатывающих запасы полезных ископаемых открытым способом, весьма остро стоят вопросы обеспечения устойчивости откосов уступов в рабочем состоянии. Одним из главных факторов, отрицательно сказывающихся на устойчивость откосов уступов, являются высокие сейсмозрывные нагрузки, возникающие в результате взрывной отбойки массива.

Основным методом, снижающим сейсмическое действие взрывов, является применение метода предварительного щелеобразования. Суть метода заключается во взрыве в ненарушенном массиве близко расположенных скважин малого диаметра, расположенных параллельно друг другу в плоскости, соответствующей

проектной поверхности откоса уступа в его конечном положении. После взрыва зарядов в массиве образуется щель, служащая преградой, экранирующей волны напряжений от взрывов основных зарядов [1, 2].

В связи с тем, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики расчета воздействия на массив контурных зарядов, а экспериментально довольно трудно это воздействие оценить в ближней зоне, было выполнено численное моделирование в программном продукте Ansys Autodyn, реализующим метод конечных элементов для расчета высоко нелинейной динамики твердых тел, жидкостей и газов, а также их взаимодействия [3]. Более детальное описание работы расчетного алгоритма приведено в работе [4].

Постановка задачи

В первой части работы рассмотрен взрыв контурного ряда скважин. Рассмотрено два варианта взрыва контурной щели — для сухих и обводненных сква-

жин. В качестве контурных зарядов использовались линейные заряды сплошной колонковой конструкции ЗКВ-Б диаметром 43 мм, которые помещались в скважины диаметром 140 мм. Расстояние между скважинами 1,5 м. Угол наклона скважин принят равным 75° . При таком угле контурный заряд прилегает к стенке скважины, что и было заложено в модель. Численные значения параметров радиальных и тангенциальных напряжений, а также скоростей смещения частиц массива снимались в точках, расположенных на расстоянии 1 и 5 м от скважин в сторону массива.

В качестве ВВ выбраны заряды ЗКВ-Б ($\rho = 1630 \text{ кг/м}^3$; $D = 6930 \text{ м/с}$; $Q = 6000 \text{ МДж/м}^3$; $P = 21 \text{ ГПа}$).

Физико-механические и прочностные параметры горной породы соответствуют усредненным параметрам апатит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения ($\rho = 2980 \text{ кг/м}^3$; $V_p = 4770 \text{ м/с}$; $\sigma_{сж} = 160 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 16 \text{ МПа}$; $G = 27 \text{ ГПа}$). Более подробное описание модели приведено в работе [5].

Массив породы моделируется путем привязки геометрии к лагранжевому решателю, а взрывчатое вещество, продукты детонации и окружающая среда посредством многокомпонентного эйлерового решателя. Данный подход к решению задач взрыва является одним из основных в программных продуктах подобного класса, и широко освещен в работах зарубежных и отечественных исследователей [6–12].

Полученные результаты

На рис. 1 показано распределение поля напряжений при формировании отрезной щели в различные моменты времени.

Из анализа распределения напряжений следует, что после инициирования зарядов между скважинами формируется поле растягивающих напряжений, уровень которых превышает предел прочности пород на растяжение, что в конечном итоге приводит к развитию трещин по линии расположения зарядов и образованию отрезной щели.

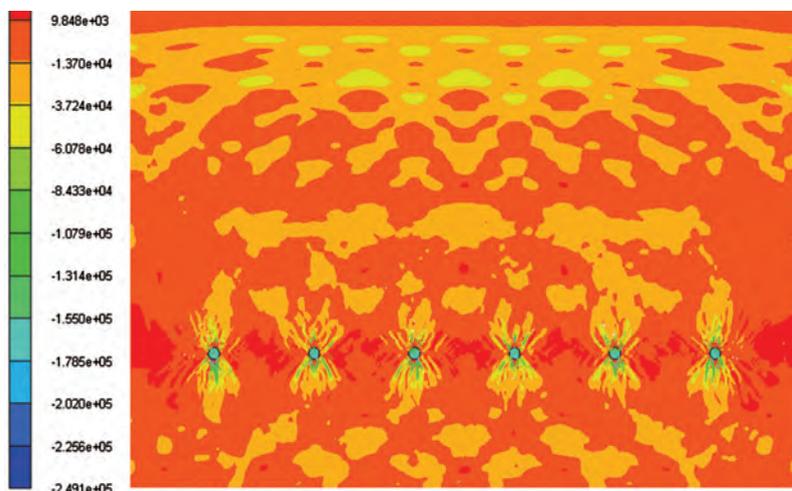


Рис. 1. Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели: на момент времени 1 мс после взрыва (а); на момент времени 30 мс после взрыва контурных зарядов с воздушным промежутком (б)

Fig. 1. Stress field distribution and blasted slot making: (a) 1 ms after blast; (b) 30 ms after explosion of air-decoupled perimeter charges

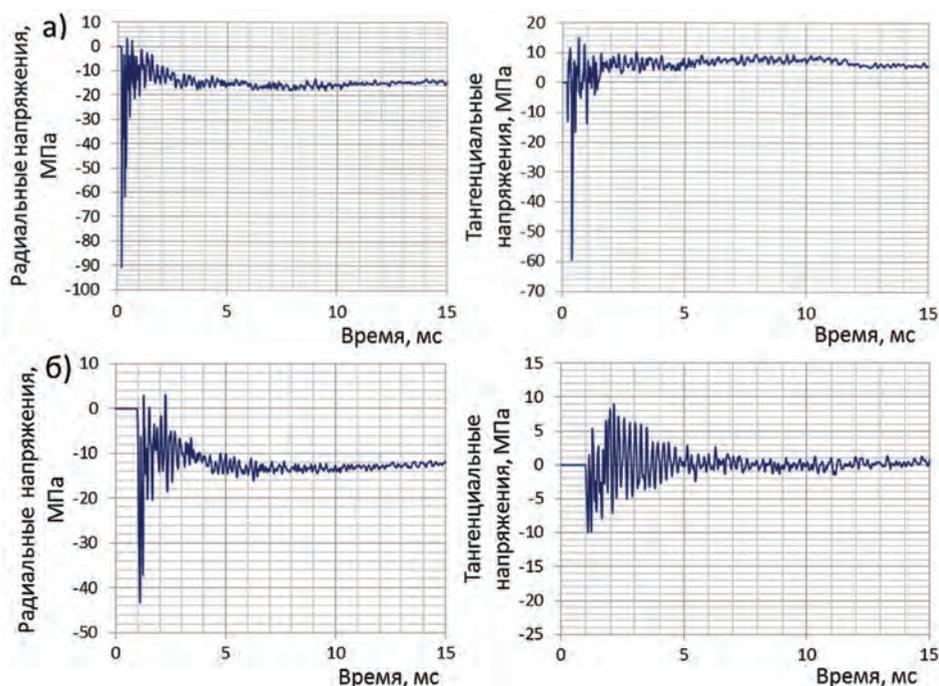


Рис. 2. Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м от линии зарядов (а) и на расстоянии 5,0 м (б) после взрыва контурных зарядов с воздушным промежутком
 Fig. 2. Radial and shearing stresses at a distance (a) 1.0 m and (b) 5.0 m from the blasthole line explosion of air-decoupled perimeter charges

Графики радиальных (σ_3) и тангенциальных (σ_1) напряжений на расстоянии 1,0 и 5,0 м от линии зарядов представлены на рис. 2.

Из графиков следует, что радиальные и тангенциальные сжимающие напряжения на расстоянии 5 м имеют пиковое значение 43 МПа и 10 МПа соответ-

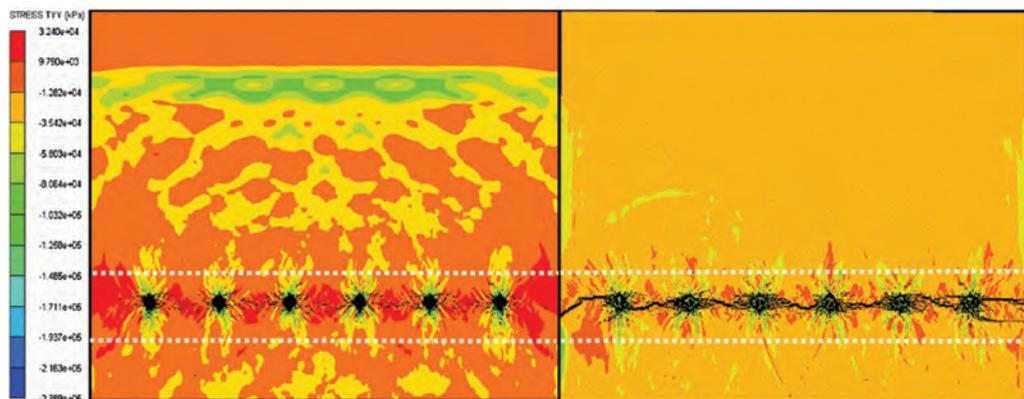


Рис. 3. Распределение поля напряжений и формирование отрезной щели: на момент времени 1 мс после взрыва (а); на момент времени 30 мс после взрыва контурных зарядов с водяным промежутком (б)
 Fig. 3. Stress field distribution and blasted slot making: (a) 1 ms after blast; (b) 30 ms after explosion of water-decoupled perimeter charges

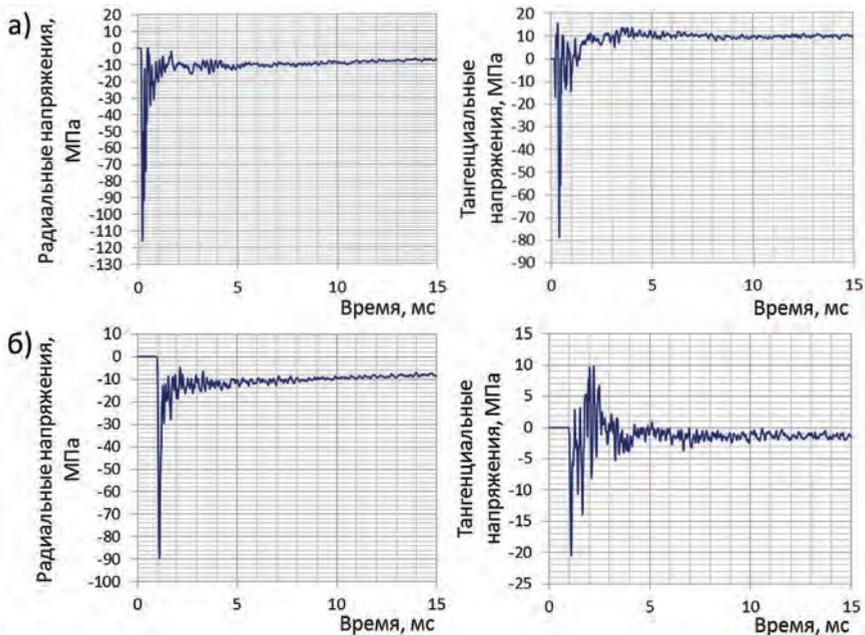


Рис. 4. Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 1,0 м (а) и 5,0 м (б) от линии зарядов после взрыва контурных зарядов с водяным промежутком
 Fig. 4. Radial and shearing stresses at a distance (a) 1.0 m and (b) 5.0 m from the blasthole line explosion of water-decoupled perimeter charges

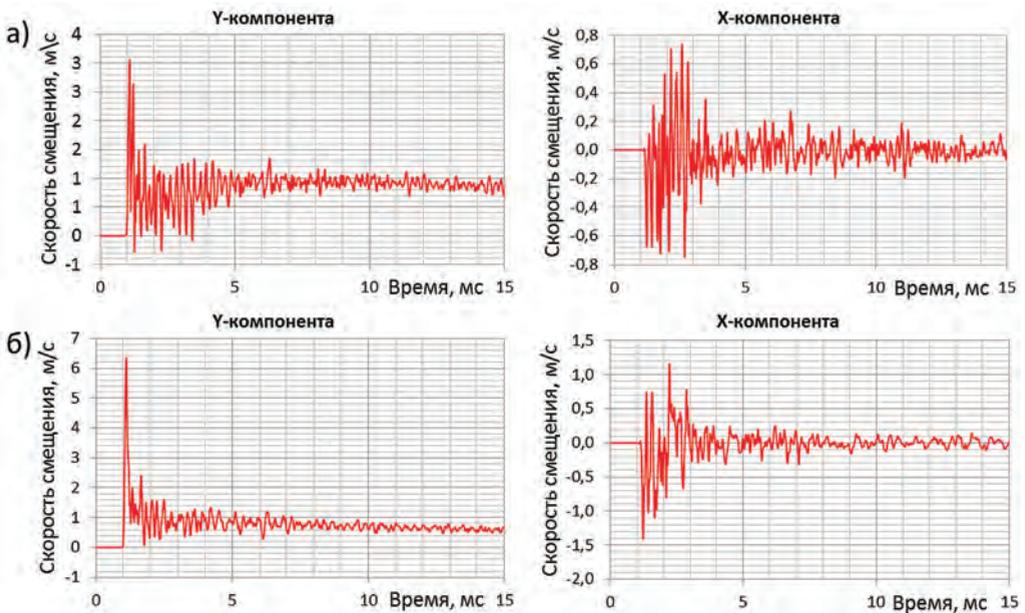


Рис. 5. Скорости смещения точек массива по компонентам X и Y: при взрыве зарядов с воздушным радиальным зазором (а); при взрыве зарядов с радиальным зазором заполненным водой (б)
 Fig. 5. PPV in rock mass along X and Y: (a) under blasting of decoupled charges with radial air gap (b) under blasting of charges with radial water gap

ственно, а растягивающие по тангенциальной компоненте 9 МПа, что значительно меньше прочностных характеристик массива горных пород. На расстоянии 1 м сжимающие напряжения имеют пиковое значение 92 и 60 МПа, а растягивающие по тангенциальной компоненте 16 МПа, что превышает предел прочности горных пород на отрыв.

При взрыве контурных зарядов с водяным промежутком характер развития трещин несколько отличается от взрыва с воздушным промежутком (рис. 3). В данном случае на более ранней стадии начинают формироваться трещины между скважинами и увеличивается зона нарушений вблизи взрываемой щели, что связано с увеличением практически в два раза напряжений вследствие явления гидроудара (рис. 4).

Из распределений скоростей смещения точек массива (рис. 5) следует, что происходит двукратное увеличение амплитуды по обоим компонентам. Так, при взрыве зарядов с воздушным радиальным зазором максимальное значение скоростей составляет 3,2 и 0,75 м/с по Y и X-компонентам, а при взрыве зарядов с радиальным зазором заполненным водой — 6,4 и 1,4 м/с.

С целью определения экранирующего действия отрезной щели в вышеописанную модель взрывания был добавлен участок массива, содержащий две скважины приконтурного блока диаметром 165 мм расположенные по сетке 3,9×4,1 м. В качестве зарядов блока выбрано ANFO. Интервал замедлений между скважинами — 17 мс. опережение взрыва отрезной щели к скважинам приконтурного блока принято равным 10 мс. Картина распределения первого главного напряжения и разрушения массива через 1 мс после инициирования ближней к отрезной щели скважины приведена на рис. 6.

С целью определения экранирующего действия отрезной щели в вышеописанную модель взрывания был добавлен участок массива, содержащий две скважины приконтурного блока диаметром 165 мм расположенные по сетке 3,9×4,1 м. В качестве зарядов блока выбрано ANFO. Интервал замедлений между скважинами — 17 мс. опережение взрыва отрезной щели к скважинам приконтурного блока принято равным 10 мс. Картина распределения первого главного напряжения и разрушения массива через 1 мс после инициирования ближней к отрезной щели скважины приведена на рис. 6.

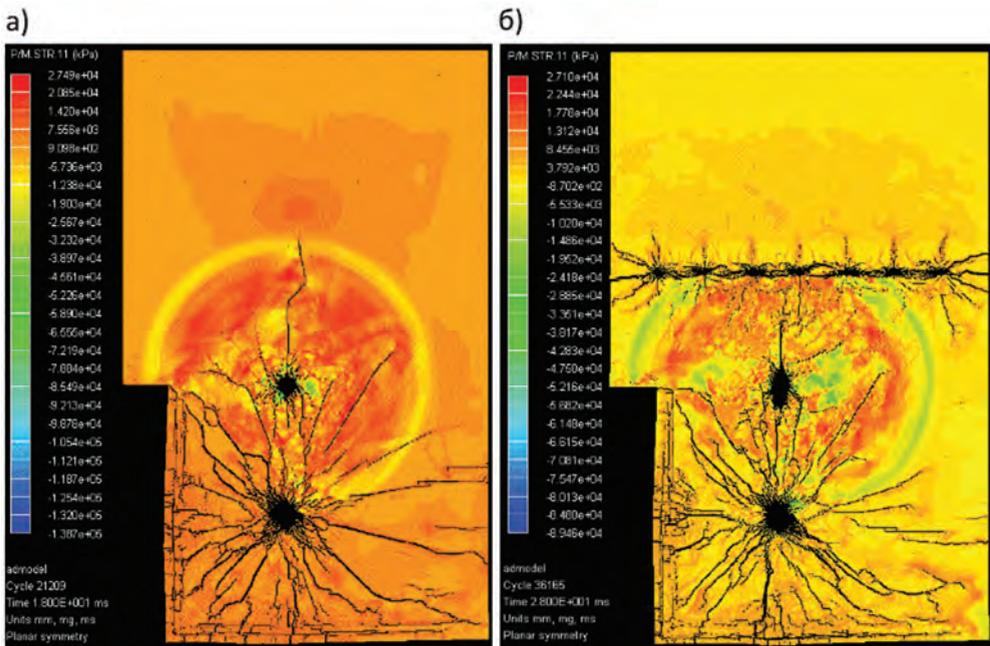


Рис. 6. Распределение поля напряжений и разрушение массива через 1 мс после инициирования крайней скважины: без учета отрезной щели (а); с учетом отрезной щели (б)

Fig. 6. Stress field distribution and rock mass breakage 1 m after initiation of end hole: (a) without regard to blasted slot; (b) with regard to blasted slot

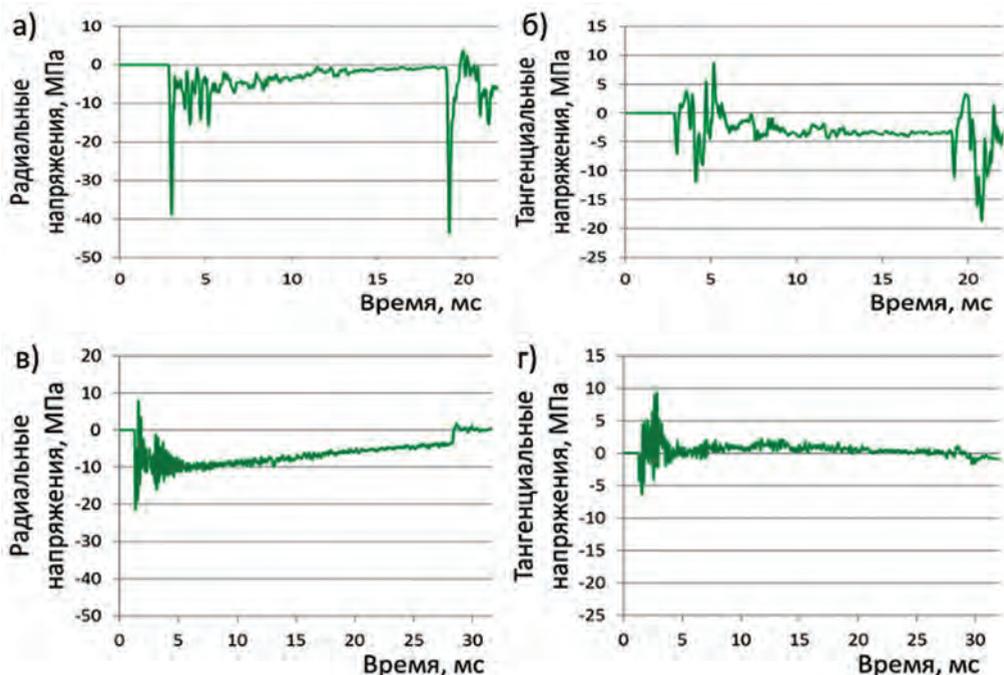


Рис. 7. Радиальные и тангенциальные напряжения на расстоянии 10 м от скважин: без учета отрезной щели (а, б); с учетом отрезной щели (в, г)

Fig. 7. Radial and shearing stress at a distance of 10 m from blastholes: (a, b) without regard to blasted slot; (c, d) with regard to blasted slot

Из анализа распределения напряжений и разрушений следует, что сформированная отрезная щель выступает в роли свободной поверхности, экранирующей волны напряжений и препятствующей росту трещин вглубь массива (о чем свидетельствует отражение волны напряжений от вновь образованной свободной поверхности и появление откольных трещин вдоль щели со стороны зарядов основного блока).

Графики напряжений на расстоянии 10 м от крайней скважины представлены на рис. 7.

Из графиков следует, что на расстоянии 10 м от приконтурного блока отчетливо прослеживаются два характерных скачка напряжений, вызванных взрывами скважин (рис. 7 а, б), при этом максимальное радиальное напряжение составляет 44 МПа, тангенциальное — 9 МПа. Анализ графиков напряжений с

учетом сформированной отрезной щели показывает, что скачок напряжений приурочен непосредственно к взрыву самой щели в начальный момент времени (рис. 7 в, г), при этом волны напряжений, возникающие в результате взрыва зарядов приконтурного блока, практически полностью экранируются, что ведет к снижению сейсмозрывной нагрузки на за-контурный массив.

Выводы

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что при взрыве контурного ряда наличие воды в скважинах приводит к значительному изменению НДС приконтурного массива в ближней зоне взрыва. Вследствие явления гидроудара уровень действующих в массиве напряжений резко повышается, что ведет к увеличению зоны переизмельчения вблизи скважин-

ных зарядов и изменению уровня действующих сейсмозрывных нагрузок на вмещающий массив, что необходимо учитывать при разделке отрезных щелей.

Показано, что разделка отрезной щели является высокоэффективным способом снижения сейсмозрывных нагрузок на законтурный массив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фадеев А. Б.* Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах. — М.: Недра, 1972. — 136 с.
2. *Козырев С. А., Аленичев И. А., Усачев Е. А., Соколов А. В.* Сейсмическое действие массовых взрывов на бортах карьера рудника «Железный» // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2017. — № 14. — С. 288—291.
3. Ansys inc. Autodyn. Explicit software for non-linear dynamics: theory manual. Ansys inc., 2005. — 235 p.
4. *Козырев С. А., Камянский В. Н., Аленичев И. А.* Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними // Взрывное дело. — 2017. — № 117/74. — С. 60—75.
5. *Камянский В. Н.* Оценка влияния сейсмозрывных нагрузок в ближней зоне взрыва // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — СВ 23. — С. 316—325.
6. *Kozyrev S., Alenichev I., Kamyansky V.* Particularities of destruction of out-contour rock mass associated with blasting the system of borehole charges // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Т. 17. № 13. pp. 653—659.
7. *Alia A., Souli M.* High explosive simulation using multi-material formulations // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26, pp. 1032—1042.
8. *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.
9. *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.
10. *Ugric M.* Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles // Scientific Technical Review. 2013. Vol. 63, no. 2, pp. 47—57.
11. *Wang et al.* A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast. 2005. Vol. 83, pp. 339—356.
12. *Zhu Z. et al.* Numerical investigation of blast-induced damage in cylindrical rocks // International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2008. Vol. 45, pp. 111—121. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 181—188.

Estimation of seismic load of blasting on pit wall rock mass during blasted slot making

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

Abstract. Based on 2D elastoplastic numerical modeling, the process of blasted slot making during perimeter control blasting of decoupled charges with radial gaps filled with air and water is studied. The stress field patterns under blasted slot making are obtained, and the field of effective radial and shearing stresses in the near range of explosion is investigated for the conditions in question. From the results of the accomplished numerical experiments, the variation in the radial and shearing stresses and in the values of PPV in the pit

wall rock mass is determined as function of distance from blasted slot. It is found that the perimeter control blasting in the presence of water in holes results in considerable change in the stress state in the pit wall rock mass in the blast near zone, which should be taken into account when making blasted slots. The screening effect of the made blasted slot during pit wall blasting is estimated. It is illustrated that the application of the pre-fracturing method is an efficient tool of reduction in seismic load of blasting on pit wall rock mass.

Keywords: numerical simulation, finite element method, blast, contour blasting, pre-split blasting.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-181-188

REFERENCES

1. Fadeev A. B. *Drobyashchee i seismicheskoe deystvie vzryvov na kar'erakh* [Fragmenting and seismic effect of blasts in open pit mines], Moscow, Nedra, 1972, 136 p.
2. Kozyrev S. A., Alenichev I. A., Usachev E. A., Sokolov A. V. Seismicheskoe deystvie massovykh vzryvov na bortakh kar'era rudnika «Zheleznyy» [Seismic effect of large-scale blasts on pit walls in Zhelezny open pit mine]. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2017, no 14, pp. 288–291. [In Russ].
3. Ansys inc. *Autodyn. Explicit software for non-linear dynamics: theory manual*. Ansys inc., 2005. 235 p.
4. Kozyrev S. A., Kamyanskiy V. N., Alenichev I. A. Otsenka vzaimodeystviya skvazhinnykh zaryadov pri razlichnykh intervalakh zamedleniy mezhdru nimi [Estimation of interaction between borehole charges at different delay intervals]. *Vzryvnoe delo*. 2017, no 117/74, pp. 60–75. [In Russ].
5. Kamyanskiy V. N. Otsenka vliyaniya seysmovzryvnykh nagruzok v blizhney zone vzryva [Estimation of seismic load of blasting in near zone of explosion]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Special edition 23, pp. 316–325. [In Russ].
6. Kozyrev S., Alenichev I., Kamyanskiy V. Particularities of destruction of out-contour rock mass associated with blasting the system of borehole charges. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2017. T. 17, no 13. pp. 653–659.
7. Alia A., Souli M. High explosive simulation using multi-material formulations. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26, pp. 1032–1042.
8. 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.
9. 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.
10. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles. *Scientific Technical Review*. 2013. Vol. 63, no. 2, pp. 47–57.
11. Wang et al. *A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast*. 2005. Vol. 83, pp. 339–356.
12. Zhu Z. et al. Numerical investigation of blast-induced damage in cylindrical rocks. *International journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2008. Vol. 45, pp. 111–121.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА КОМПЛЕКСНОЙ ПОДСТАНЦИИ

(№ 1135/07-18 от 22.05.2018 г.; 6 с.)

Злобин Денис Андреевич — студент, e-mail: denis_zlobin_1994@mail.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

Рассмотрены вопросы, связанные с выбором оборудования. Основной задачей является выбор оптимального оборудования для комплексной трансформаторной подстанции, выбор которых необходимо для решения задач модернизации.

Ключевые слова: модернизация, оборудование, комплексная трансформаторная подстанция.

MODERNIZATION OF POWER LINES IN AN INTEGRATED SUBSTATION

Zlobin D.A., Student, e-mail: denis_zlobin_1994@mail.ru,

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The issues related to the choice of equipment are considered. The main task is to choose the optimal equipment for a complex transformer substation, the choice of which is necessary to solve the problems of modernization.

Key words: modernization, equipment, complete transformer substation.