

УДК 622.26:622.235.001.57

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ЗАБОЕ ВЫРАБОТКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

В. В. Круковская

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины
ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E-mail: igtm@ukr.net

Разработана математическая модель протекания связанных процессов изменения напряженного состояния горного массива под действием веса вышележащих пород, при взрыве сосредоточенных зарядов и нестационарной, нелинейной фильтрации газообразных продуктов детонации. С использованием метода конечных элементов проведено численное моделирование и выполнена оценка параметров поля напряжений при взрыве шпуровых зарядов на опережающую компенсационную скважину в забое подготовительной выработки с учетом сил горного давления. По критериям принадлежности конечного элемента области неупругих деформаций и превышения градиентом давления газа критических значений построены полости разрушения при взрывании зарядов взрывчатых веществ в забое выработки при различных схемах расположения шпуровых зарядов и компенсационной скважины. Показано, что использование компенсационной скважины обеспечивает подвигание забоя выработки при меньшей мощности зарядов взрывчатых веществ.

Ключевые слова: напряженное состояние породного массива, буровзрывной способ проходки, численное моделирование.

ЗМІНА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПОРОДНОГО МАСИВУ У ВИБОЇ ВИРОБКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ БУРОВИБУХОВИХ РОБІТ

В. В. Круковська

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України
вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E-mail: igtm@ukr.net

Розроблено математичну модель протікання зв'язаних процесів зміни напруженого стану гірського масиву під дією ваги розташованих вище порід, при вибуху зосереджених зарядів і нестационарної, нелінійної фільтрації газоподібних продуктів детонації. З використанням методу скінченних елементів проведено чисельне моделювання і виконана оцінка параметрів поля напружень при вибуху шпурових зарядів на випереджальну компенсаційну свердловину у вибої підготовчої виробки з урахуванням сил гірського тиску. За критеріями приналежності скінченного елемента області непружних деформацій та перевищення градієнтом тиску газу критичних значень побудовано порожнини руйнування при підірванні зарядів вибухових речовин у вибої виробки при різних схемах розташування шпурових зарядів і компенсаційної свердловини. Показано, що використання компенсаційної свердловини забезпечує посування вибою виробки при меншій потужності зарядів вибухових речовин.

Ключові слова: напружений стан породного масиву, буровибуховий спосіб проходки, чисельне моделювання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Проведение горных выработок буровзрывным способом по прочным породам – одна из важнейших составляющих технологического процесса добычи полезных ископаемых. При этом выбор рациональной технологии, обеспечивающей оптимальную скорость проведения подземных выработок, является главным условием достижения высоких технико-экономических показателей и интенсификации горного производства [1–3]. Изучение напряженно-деформированного состояния призабойного массива горных пород имеет большое значение для определения рациональных параметров ведения буровзрывных работ и повышения темпов проходки выработки.

Выбор и обоснование оптимального расположения шпуров и компенсационной скважины в забое выработки можно осуществить при помощи математического моделирования, решив задачу об определении напряженного состояния пород в забое при взрыве шпуровых зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на компенсационную скважину.

Цель работы – с использованием метода конечных элементов провести численное моделирование и выполнить оценку параметров поля напряжений от взрыва шпуровых зарядов на опережающую компенсационную скважину с учетом сил горного давления в забое подготовительной выработки.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЙ. Изменение напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки описывается уравнением [4]:

$$\sigma_{ij,j} + X_i(t) + Y_i(t) - c_g \frac{\partial u_i}{\partial t} = \rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2},$$

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y ; t – время; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела; $Y_i(t)$ – проекции сил от действия взрыва; c_g – коэффициент демпфирования; u_i – перемещение; ρ_s – плотность породы.

Расчет радиальной $\sigma_r(r, t)$ и тангенциальной $\sigma_\phi(r, t)$ составляющих волны напряжений при взрыве сосредоточенного заряда в диапазоне расстояний $r = (20 \dots 100)R_0$, где R_0 – радиус заряда, проводится с использованием зависимостей, полученных для крепких горных пород [5].

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в результате отрыва.

Уравнение фильтрации газообразных продуктов детонации:

$$\mu_z \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0;$$

где μ_g – вязкость газа; p – давление газа; k_x , k_y – коэффициенты проницаемости твердого тела.

При изучении динамических процессов в некоторые моменты времени скорость может не удовлетворять условию Дарси, и тогда необходимо учитывать зависимость между градиентом давления и более высокими степенями скоростей фильтрации [4]. Такие законы получены авторами [6, 7], и, если $k = k(\bar{v})$, их можно записать в виде [4]:

$$v_x = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial y}.$$

Тогда с учетом зависимости от изменяющегося во времени поля напряжений [8] проницаемость горных пород в каждой точке исследуемой области определяется функцией $k = f(t, \bar{v}, \sigma_{ij})$.

Начальные и граничные условия для данной задачи:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}|_{t=0} &= \mathcal{H}; \\ \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \mathcal{H}; \\ u_x|_{\Omega_1} &= 0; \\ u_y|_{\Omega_2} &= 0; \\ p|_{t=0} &= p_0; \\ p|_{\Omega_3(t)} &= p_0; \\ p|_{\Omega_4} &= p_v; \\ p_v &= 0,1 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

где γ – усредненная плотность вышележащих горных пород; H – глубина разработки; λ – коэффициент бокового распора; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; p_0 – давление газа в нетронутом массиве; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка).

Чтобы получить решение на определенном временном промежутке [9, 10], применяется конечно-разностный метод.

Для оценки напряженного состояния используются геомеханические параметры: $Q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующий степень разнокомпонентности поля напряжений, и $P = \sigma_3/\gamma H$, характеризующий возможность хрупкого разрушения горных пород.

Используя предложенную математическую модель и учитывая эффект отражения взрывной волны от свободной поверхности забоя выработки, а в случае применения компенсационной скважины – и от свободной поверхности скважины, проведем расчеты для определения поля напряжений от взрыва шпуровых зарядов в забое выработки. Выполним расчет для случаев, когда в забое расположена компенсационная скважина диаметром 500 мм, длиной

2400 мм, и когда ее нет, а также для двух и четырех зарядов ВВ, расположенных в исследуемой плоскости. Диаметр шпура для взрывания заряда равен 40 мм, а радиус $R_0 = 20$ мм. Глубина проведения выработки – 1000 м. Скорость распространения звука в породе – 5000 м/с.

Взрывание зарядов будем производить на 20-й временной итерации ($i = 20$), чтобы учесть разгрузку приконтурных пород от горного давления, которая происходит после подвигания забоя во время бурения шпуров и установки зарядов ВВ.

Получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций для перечисленных схем проведения буровзрывных работ, рис. 1.

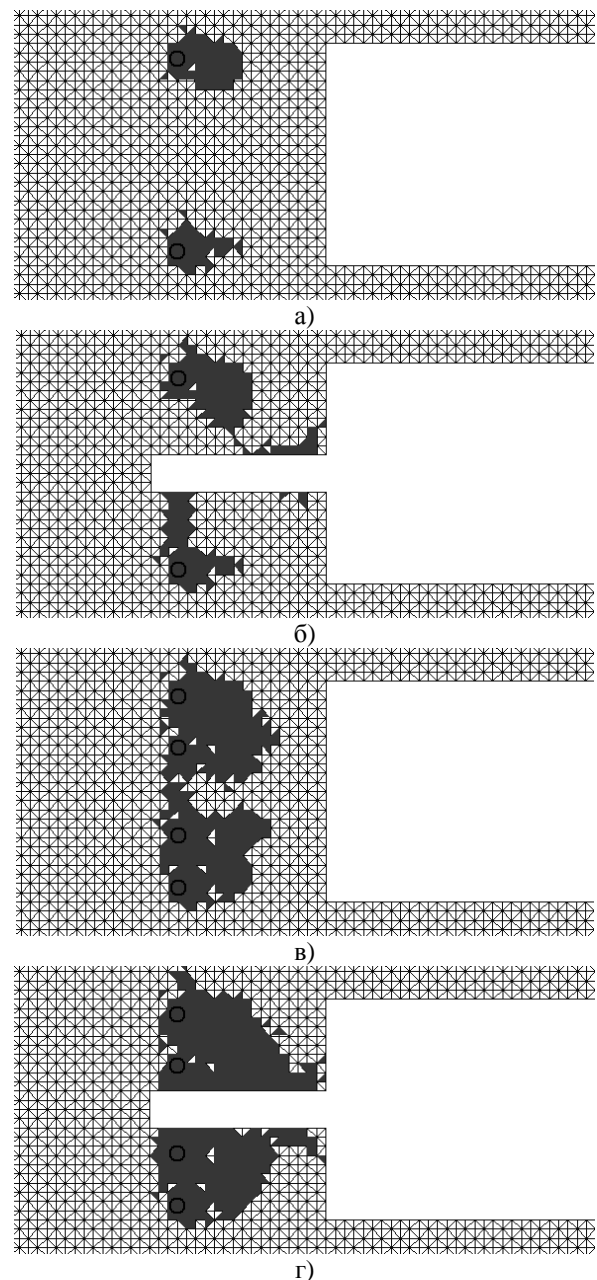


Рисунок 1 – Область неупругих деформаций, $i = 20$: а) без компенсационной скважины, 2 заряда; б) со скважиной, 2 заряда; в) без компенсационной скважины, 4 заряда; г) со скважиной, 4 заряда

Видно, что перед взрывом, рис. 2 а, контур выработки разгружен от горного давления. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое выработки, рис. 2 б. Вокруг заряда образуется область полностью разрушенных пород, далее расположены области сильно нарушенных пород (темно-серый цвет, $0,8 < Q < 1,2$) и повышенной трещиноватости (светло-серый цвет, $0,4 < Q < 0,8$). Заряды ВВ окружены зоной неупругих деформаций, рис. 1 а, которая не достигает поверхности забоя выработки. Это означает, что в результате взрывания шпуровых зарядов порода в забое разрыхлится, но полость разрушения, обеспечивающая подвигание забоя, не образуется.

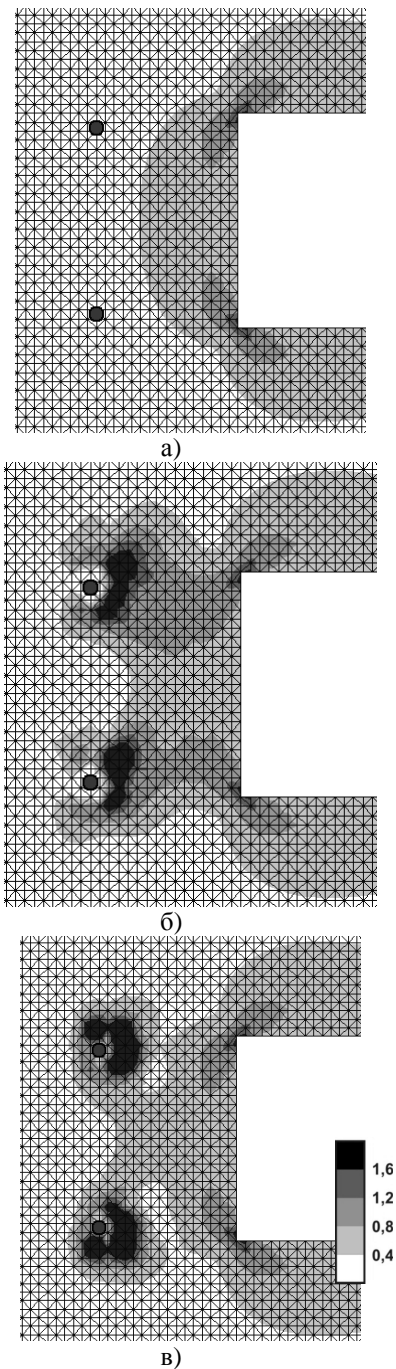


Рисунок 2 – Распределение значений параметра Q для выработки без компенсационной скважины, 2 заряда ВВ: а) $i = 19$; б) $i = 20$; в) $i = 21$

Если в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций вокруг зарядов, рис. 1 б, соединяется со скважиной. Это происходит в том числе и за счет отражения взрывной волны от поверхностей компенсационной скважины. Однако взрывного воздействия от двух зарядов может быть недостаточно для образования полости необходимых размеров, рис. 3.

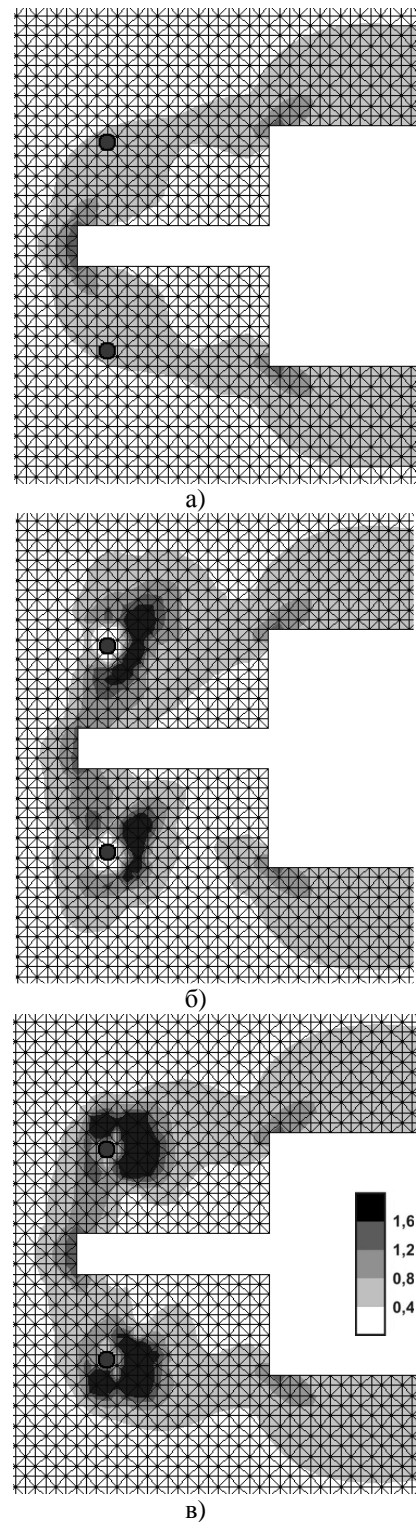
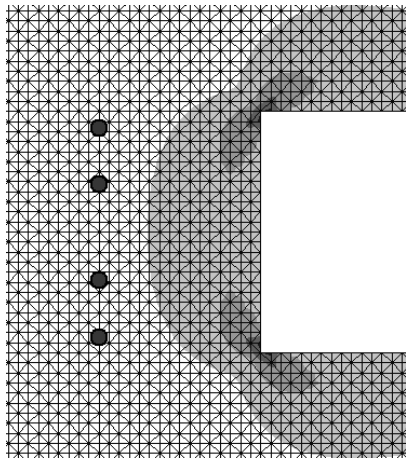
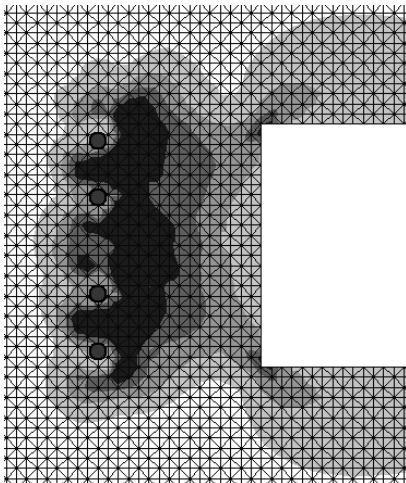


Рисунок 3 – Распределение значений параметра Q для выработки с компенсационной скважиной, 2 заряда ВВ: а) $i = 19$; б) $i = 20$; в) $i = 21$

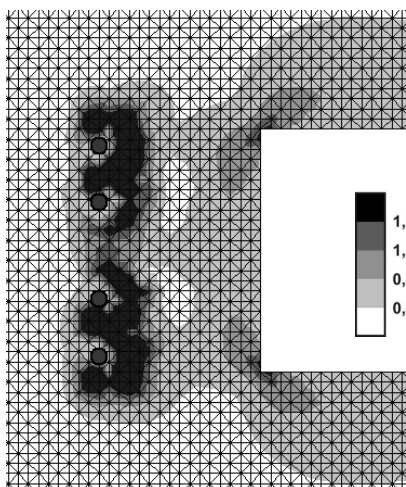
При взрывании четырех зарядов ВВ в рассматриваемой плоскости продольного сечения выработки изменение поля напряжений более интенсивно, рис. 4, зона неупругих деформаций, рис. 1 в, имеет большие, чем на рис. 1 а, размеры, но и в этом случае она не выходит на поверхность забоя.



а)



б)

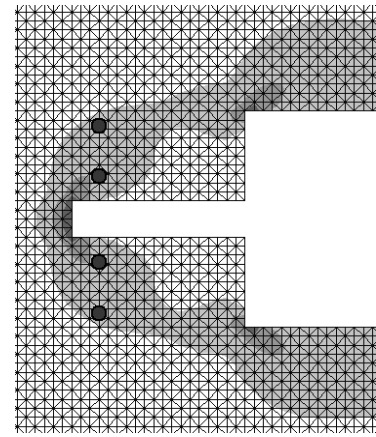


в)

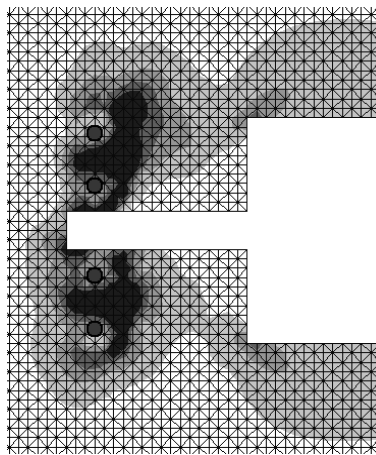
Рисунок 4 – Распределение значений параметра Q для выработки без компенсационной скважины, 4 заряда ВВ: а) $i = 19$; б) $i = 20$; в) $i = 21$

Когда в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций – разрушенных пород – простирается от зарядов до поверхностей забоя и скважины, рис. 1 г.

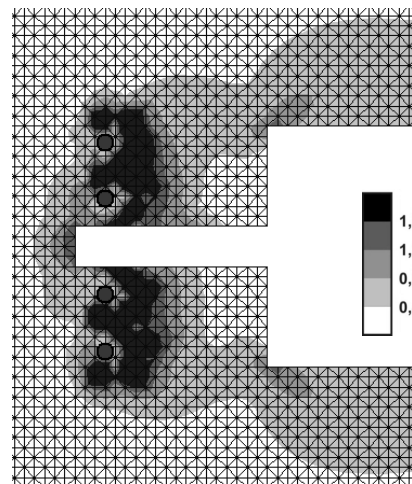
Чтобы добиться такого же эффекта без компенсационной скважины, необходимо увеличивать радиус зарядов. Таким образом, использование компенсационной скважины обеспечивает подвигание забоя выработки при меньшей мощности зарядов ВВ.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Распределение значений параметра Q для выработки с компенсационной скважиной, 4 заряда ВВ: а) $i = 19$; б) $i = 20$; в) $i = 21$

По критериям принадлежности конечного элемента области неупругих деформаций и превышения градиентом давления газа критических значений построим полость разрушения при взрыве зарядов ВВ на 20-й временной итерации во всех рассмотренных случаях, рис. 6.

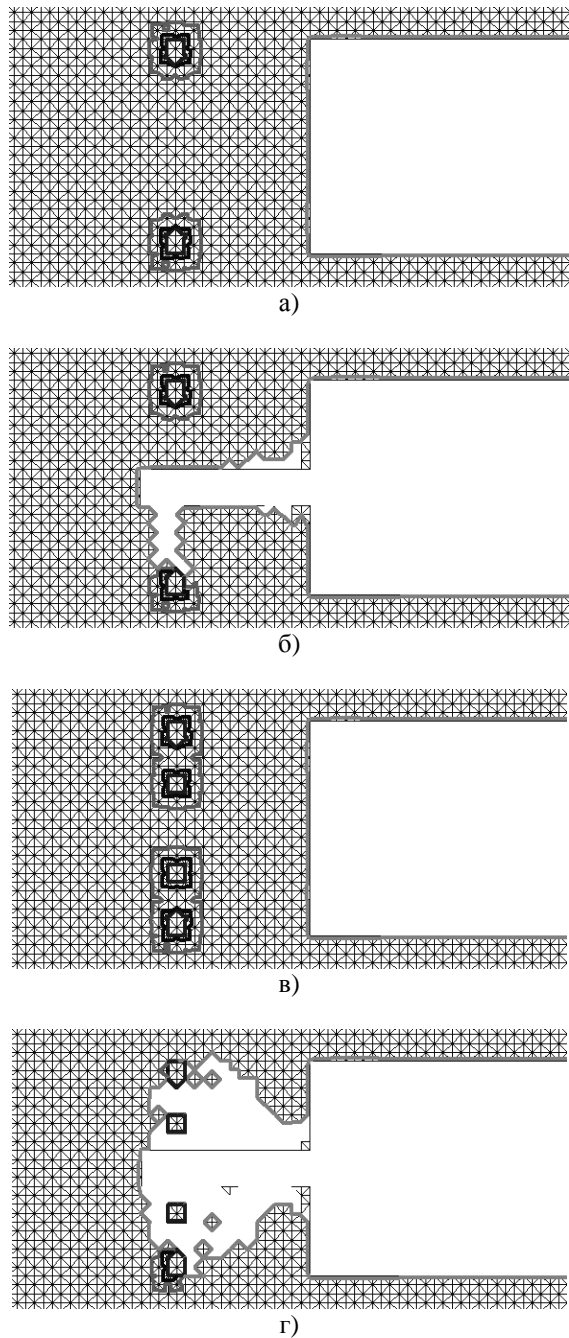


Рисунок 6 – Полость разрушения и давление газа, $i = 20$:

- $p/p_0 = 0,1$; ————— $p/p_0 = 1,0$;
 ————— $p/p_0 = 5,0$; ————— $p/p_0 = 10,0$;
 а) без компенсационной скважины, 2 заряда;
 б) со скважиной, 2 заряда;
 в) без компенсационной скважины, 4 заряда;
 г) со скважиной, 4 заряда

Можно видеть, что при взрыве заряды ВВ окружает область высокого давления газообразных продуктов детонации. Для данных начальных и граничных условий, заданного радиуса зарядов полость

разрушения образуется только в случаях применения компенсационной скважины.

ВЫВОДЫ. В результате проведенной работы разработана математическая модель протекания связанных процессов изменения напряженного состояния горного массива под действием веса вышележащих пород, при взрыве сосредоточенных зарядов и нестационарной, нелинейной фильтрации газообразных продуктов детонации. Показано, что использование компенсационной скважины обеспечивает подвигание забоя выработки при меньшей мощности зарядов ВВ.

Исследования изменения напряженного состояния породного массива в забое горной выработки при взрыве шпуровых зарядов ВВ позволяют усовершенствовать буровзрывной способ проведения выработок по крепким напряженным породам, в том числе при использовании компенсационных скважин в забое выработки; обосновать выбор схем расположения шпуровых зарядов с учетом слоистости и физико-механических свойств каждого породного слоя.

Исследования выполнены на основании постановления Бюро отделения механики НАН Украины от 08.11.2011 г. по выполнению комплексной темы «Развитие научных основ безопасного ведения горных работ в замкнутом цикле добычи, переработки и хранения отходов переработки урановых руд».

ЛІТЕРАТУРА

1. Моделирование геомеханических процессов в массиве горных пород при взрыве шпурового заряда ВВ на компенсационную скважину / Ю.И. Кияшко, В.В. Круковская, А.П. Круковский, К.С. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ. – 2013. – № 7. – С. 75–79.
2. Экспериментально-теоретические исследования поля напряжений в забое выработки глубоких шахт / К.С. Ищенко, А.П. Круковский, В.В. Круковская, А.К. Ищенко // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах // Сб. научн. тр. СО РАН ИГД. – Новосибирск, 2012. – С. 428–433.
3. Исследование напряженного состояния массива горных пород при образовании врубовой полости в забое выработки / В.В. Круковская, А.П. Круковский, К.С. Ищенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепрпетровск, 2010. – № 89. – С. 91–98.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
5. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – М.: Недра, 1990. – 231 с.
6. Зорин А.Н., Колесников В.Г. Управление динамическими проявлениями горного давления. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
7. Линьков А.М., Петухов И.М., Сидоров В.С. О росте трещин в подготовительной стадии и на фронте выброса – Тр. ВНИИ маркшейд. ин-т. – 1977. – № 106. – С. 46–55.

8. Круковская В.В., Круковский А.П. Математическое моделирование геомеханических и фильтрационных процессов при проходке выработки буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2009. – № 81. – С.147–156.

9. Круковский А.П., Круковская В.В. Влияние анкерной крепи на изменение напряженного состояния вокруг выработки с движущимся забоем // Де-

формирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XIX Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2009. – С. 155–157.

10. Круковский А.П., Круковская В.В. Изменение напряженного состояния горных пород вокруг выработки с движущимся забоем // Форум гірників-2009: Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. – С. 73–78.

THE CHANGE OF THE ROCK MASSIF STRESS STATE IN THE WORKING FACE DURING DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

V. Krukovskaya

Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine
vul. Simferopolskaya, 2a, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine. E-mail: igtm@ukr.net.

A mathematical model of coupled processes changes of stress state of rock massif under the weight of the overlying rocks at the explosion of concentrated charges and non-stationary, nonlinear filtration of gaseous detonation products was developed. Numerical simulation with the using of finite element method was carried out and it was executed an analysis of the stress field parameters in the blast-hole charges explosion on anticipatory compensation well in the mine development working with the strength of rock pressure. Criteria of finite element membership of inelastic deformation field and the gas pressure gradient exceeding the critical values were used in the construction of destruction cavity during blasting the explosive charges in the working face at different schemes of blast-hole charges and compensation well. It is shown that the use of compensatory wells provides production face advance with less power explosive charges. References 10, figures 6.

Key words: the stress state, the rock massif, drilling and blasting method, roadheading, numerical modelling.

REFERENCES

1. Kiyashko, Yu.I., Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P., Ischenko, K.S. (2013), "Modelling of geomechanical processes in the rock massif in the blast-hole charge explosion on the compensation well", *Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy. Gorniy zhurnal*, no. 7, pp. 75–79.

2. Ischenko, K.S., Krukovskiy, A.P., Krukovskaya, V.V., Ischenko, A.K. (2012), "Experimental and theoretical studies of the stress field in the working face of deep mines", *Nelineynye geomehaniko-geodinamicheskie protsessy pri otrabotke mestorozhdeniy poleznyih iskopaemyih na bolshih glubinah*, novosibirsk, pp. 428–433.

3. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P., Ischenko, K.S. (2010), "Research of the stress condition at the gain cavity formation in the working face", *Geotechnical Mechanics*, no. 89, pp. 91–98.

4. Zenkevich, O. (1975), *Metod konechnyih elementov v tekhnike* [A finite element method in the engineering], Mir, Moscow, Russia.

5. Borovikov, V.A., Vanyagin, I.F. (1990), *Modelirovanie deystviya vzryiva pri razrushenii gornyih porod* [Simulation explosive action in rock failure], Nedra, Moscow, Russia.

6. Zorin, A.N., Kolesnikov, V.G. (1978), *Upravlenie dinamicheskimi proyavleniyami gornogo davleniya* [Management of dynamic appearances of rock pressure], Nedra, Moscow, Russia.

7. Linkov, A.M., Petuhov, I.M., Sidorov, V.S. (1977), "On the growth of cracks in the preparatory stage and on the front of the outburs", *Tr. VNIImarkshyderskogo instituta*, no. 106, pp. 46–55.

8. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. (2009), "The mathematical simulation of geomechanical and filtration processes at the drive working by blast-hole drilling in mode of shaking blasting operation", *Geotechnical Mechanics*, no. 81, pp.147–156.

9. Krukovskiy, A.P., Krukovskaya, V.V. (2009), "Influence of roof bolting to change the stress state around the working face with a moving face", *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie yavleniya v gornyih porodah i vyirabotkakh: Mater. XIX Mezhd. nauch. shkoly*, pp.155–157.

10. Krukovskiy, A.P., Krukovskaya, V.V. (2009), "Change of the rock stressed state round the roadway with the moving face", *Forum gornyakov-2009*, pp. 73–78.

Стаття надійшла 28.07.2015.