

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ ВВ НА КОМПЕНСАЦИОННУЮ СКВАЖИНУ

¹Круковская В.В., ¹Круковский А.П.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ПІДРИВАННІ ЗАРЯДІВ ВВ НА КОМПЕНСАЦІЙНУ СВЕРДЛОВИНУ

¹Круковська В.В., ¹Круковський О.П.

¹Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

NUMERICAL SIMULATION OF COUPLED PROCESSES AT BLASTING EXPLOSIVE CHARGES TOWARDS COMPENSATION BOREHOLE

¹Krukovska V.V., ¹Krukovskyi O.P.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine

Аннотация. Исследование напряженно-деформированного состояния горных пород в забое горной выработки имеет большое значение для определения рациональных параметров ведения буровзрывных работ и повышения темпов проходки. Обоснование схемы расположения шпуров и компенсационной скважины в забое выработки возможно осуществлять с помощью математического моделирования. В этой статье приведена математическая модель протекания связанных процессов изменения напряженного состояния горного массива при взрыве сосредоточенных зарядов с учетом действия веса вышележащих пород, и нестационарной, нелинейной фильтрации газообразных продуктов детонации. С применением метода конечных элементов выполнен расчет поля напряжений, зон неупругих деформаций и давления газа для различных схем расположения зарядов в забое подготовительной выработки с опережающей компенсационной скважиной и без нее. Показано, что за время бурения шпуров и установки зарядов ВВ, приконтурные породы разгружаются от горного давления. Наличие опережающей скважины увеличивает глубину разгруженной зоны в забое выработки. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое выработки: вокруг зарядов образуются зоны полностью разрушенных и нарушенных пород, области повышенной трещиноватости, заряды ВВ окружены зоной неупругих деформаций. При отсутствии компенсационной скважины зона неупругих деформаций не выходит на поверхность забоя. Если в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций вокруг зарядов соединяется ее поверхностью при взрыве двух зарядов. При взрывании четырех зарядов ВВ в плоскости продольного сечения выработки зона неупругих деформаций – разрушенных пород – простирается от зарядов до поверхностей забоя и скважины. Расчет размеров полости разрушения при взрыве зарядов ВВ подтверждает полученные выводы. 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.

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

Одной из важнейших составляющих технологического процесса добычи полезных ископаемых является проведение горных выработок буровзрывным способом по прочным породам. При этом выбор рациональной технологии обеспечивает оптимальную скорость проведения подземных выработок, достижение высоких технико-экономических показателей и интенсификацию горного производства [1-2]. 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 зарядов ВВ на компенсационную скважину.

Цель работы – выполнить численное моделирование деформирования породного массива при взрыве зарядов ВВ на опережающую компенсационную скважину с учетом сил горного давления и действия газообразных продуктов детонации, проанализировать изменение геомеханических и фильтрационных параметров при различных схемах расположения зарядов в забое подготовительной выработки.

Математическая модель деформирования породного массива при взрыве зарядов ВВ с учетом сил горного давления и действия газообразных продуктов детонации. Изменение напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности горной выработки с учетом взрывного воздействия описывается уравнением [3, 4]:

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

где $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , Па/м; t – время, с; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м³; $Y_i(t)$ – проекции сил от действия взрыва, Н/м³; $P(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением флюидов в трещинно-поровом пространстве, Н/м³; c_g – коэффициент демпфирования, Нс/м; u_i – перемещения, м; ρ_s – плотность породы, кг/м³.

Расчет радиальной $\sigma_r(r, t)$ и тангенциальной $\sigma_\varphi(r, t)$ 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:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu_g} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} \right),$$

где p – давление газа, Па; k – поле коэффициентов проницаемости породного массива μ_g – вязкость газа, Пас; m – пористость породы, %.

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 [6]. Такие законы получены авторами [7, 8], и, если $k = k(v)$, их можно записать в виде [6]:

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

где v – скорость фильтрации, м/с.

Тогда с учетом зависимости от изменяющегося во времени поля напряжений [3] проницаемость горных пород в каждой точке исследуемой области определяется функцией $k = f(t, \sigma_{ij}, v)$.

Начальные и граничные условия для данной задачи:

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

где γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина разработки, м; λ – коэффициент бокового распора; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; p_0 – давление газа в нетронутом массиве, Па; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка, скважина).

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 [9]. 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 зарядов ВВ в забое выработки с помощью метода конечных элементов [6, 10]. Выполним расчет для следующих случаев:

а) в забое выработки два заряда ВВ, расположенные в исследуемой плоскости;

б) в забое выработки расположена компенсационная скважина диаметром 500 мм, длиной 2400 мм, два заряда ВВ;

в) четыре заряда ВВ, расположенные в исследуемой плоскости;

г) компенсационная скважина тех же размеров, четыре заряда ВВ.

Диаметр шпура для взрывания заряда равен 40 мм, 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.

Результаты расчетов. Получено распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций для перечисленных схем проведения буровзрывных работ, рис. 1-5.

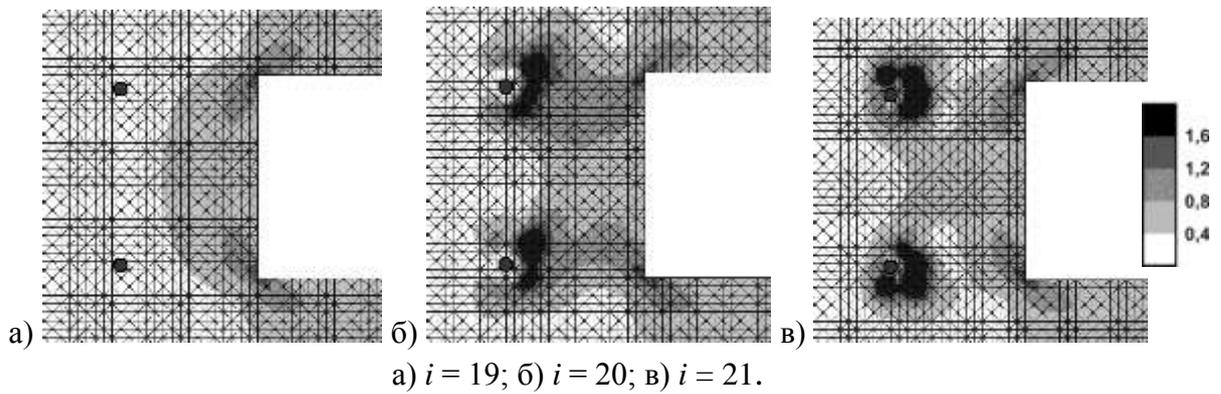


Рисунок 1 – Распределение значений параметра Q для выработки без компенсационной скважины, 2 заряда ВВ

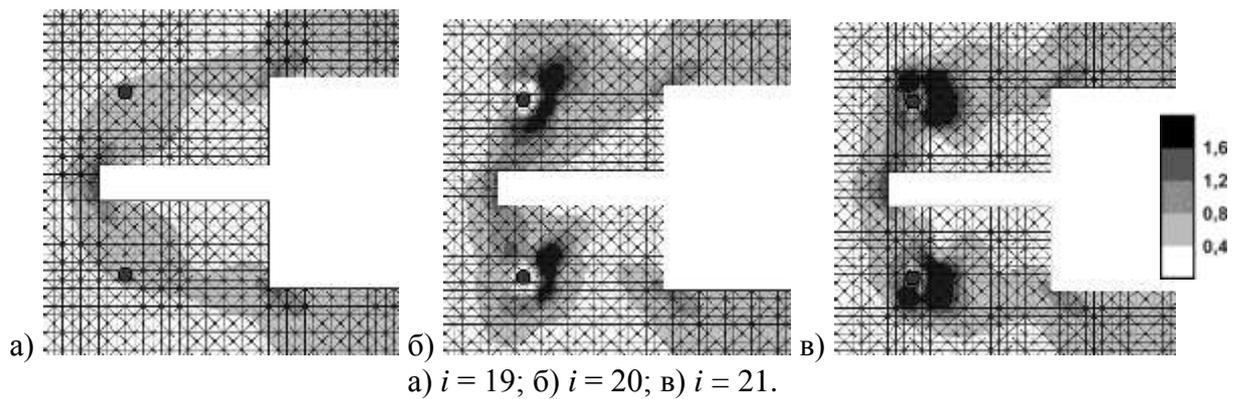


Рисунок 2 – Распределение значений параметра Q для выработки с компенсационной скважиной, 2 заряда ВВ

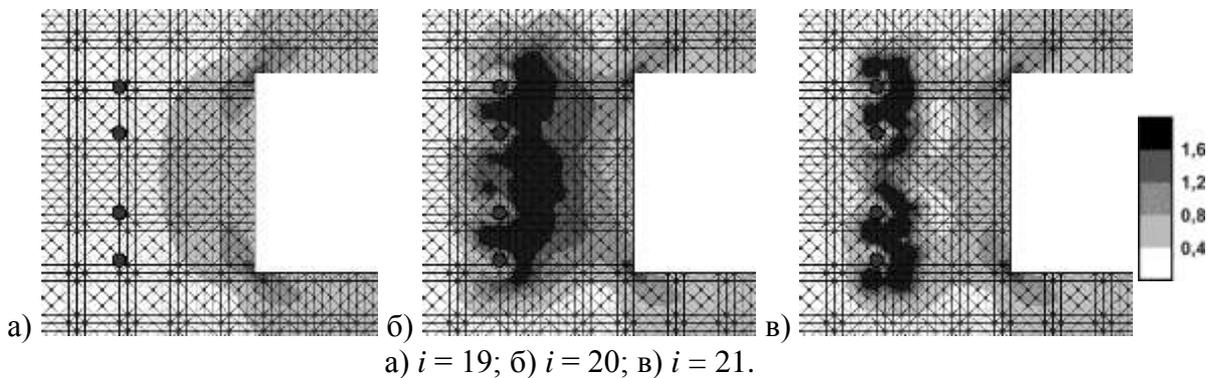


Рисунок 3 – Распределение значений параметра Q для выработки без компенсационной скважины, 4 заряда ВВ

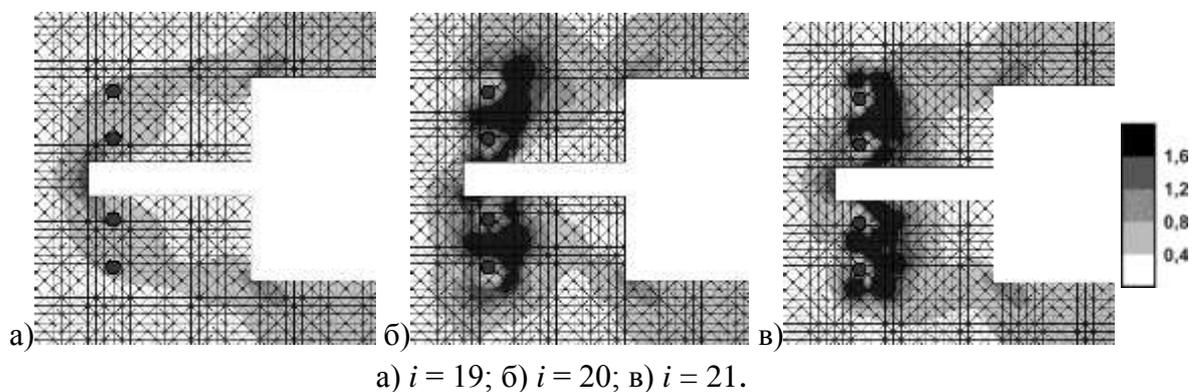
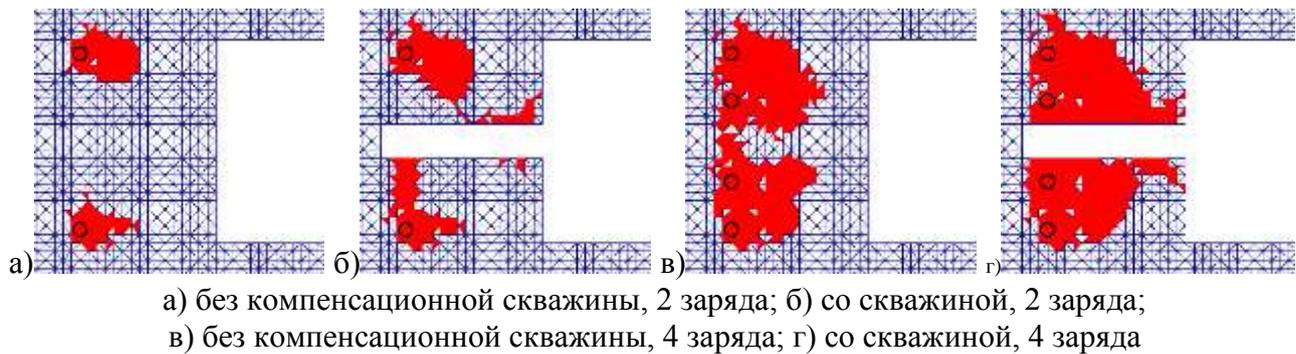


Рисунок 4 – Распределение значений параметра Q для выработки с компенсационной скважиной, 4 заряда ВВ

Рисунок 5 – Область неупругих деформаций, $i = 20$

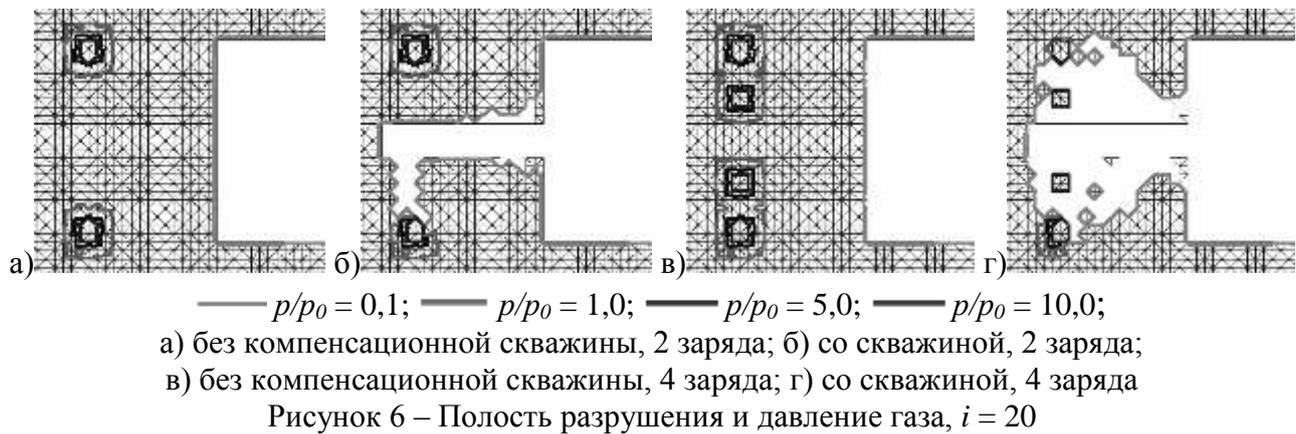
Перед взрывом, рис. 1 а, 3 а, приконтурные породы разгружены от горного давления. Наличие скважины увеличивает глубину разгруженной зоны в забое выработки. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое выработки, рис. 1-4 б. Вокруг зарядов образуется область полностью разрушенных пород, далее расположены области сильно нарушенных пород ($0,8 < Q < 1,2$) и повышенной трещиноватости ($0,4 < Q < 0,8$).

В первом случае заряды ВВ окружены зоной неупругих деформаций, рис. 5 а, которая не достигает поверхности забоя выработки. Это означает, что в результате взрывания зарядов порода в забое разрыхлится, но полости разрушения, обеспечивающей подвигание забоя, не образуется.

Если в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций вокруг зарядов, рис. 5 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.

При взрывании четырех зарядов ВВ в рассматриваемой плоскости продольного сечения выработки изменение поля напряжений более интенсивно, рис. 3, зона неупругих деформаций, рис. 5 в, имеет большие, чем на рис. 5 а, размеры, но и в этом случае она не выходит на поверхность забоя. Когда в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций – разрушенных пород – простирается от зарядов до поверхностей забоя и скважины, рис. 5 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.

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. 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. Разработана математическая модель протекания связанных процессов изменения напряженного состояния горного массива при взрыве сосредоточенных зарядов с учетом действия веса вышележащих пород, и нестационарной, нелинейной фильтрации газообразных продуктов детонации. С применением метода конечных элементов выполнен расчет поля напряжений, зон неупругих деформаций и давления газа для различных схем расположения зарядов в забое подготовительной выработки с опережающей компенсационной скважиной и без нее.

Показано, что за время бурения шпуров и установки зарядов ВВ, приконтурные породы разгружаются от горного давления. Наличие опережающей скважины увеличивает глубину разгруженной зоны в забое выработки. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое выработки: вокруг зарядов образуются зоны полностью разрушенных и нарушенных пород, области повышенной трещиноватости, заряды ВВ окружены зоной неупругих деформаций. При отсутствии компенсационной скважины зона неупругих деформаций не выходит на поверхность забоя. Если в забое выработки находится компенсационная скважина, зона неупругих деформаций вокруг зарядов соединяется ее поверхностью при взрыве двух зарядов. При взрывании четырех зарядов ВВ в плоскости продольного сечения выработки зона неупругих деформаций – разрушенных пород – простирается от зарядов до поверхностей забоя и скважины. Расчет размеров полости разрушения при взрыве зарядов ВВ подтверждает полученные выводы. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кияшко Ю.И., Круковская В.В., Круковский А.П., Ищенко К.С. Моделирование геомеханических процессов в массиве горных пород при взрыве шпурового заряда ВВ на компенсационную скважину // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ. 2013. № 7. С. 75-79.
2. Бойко В.В., Ремез Д.А. Математичне моделювання короткоуповільнених вибухів для управління спектром коливань // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук: КрНУ, 2014. Вип. 1/(13). С. 33-40.
3. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2015. № 121. С. 48-99.
4. Круковская В.В., Круковский А.П., Ищенко К.С. Анализ изменения напряженного состояния пород в забое выработки

при образовании врубовой полости // Взрывная технология. Эмпирика и теория. Достижения. Проблемы. Перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции. Тула: ТулГУ, 2011. С.44-50.

5. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород, М.:Недра, 1990. 231с.

6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.. The finite element method. Butterworth-Heinemann, 2000. Vol. 1. 690 p.

7. Зорин А.Н., Колесников В.Г. Управление динамическими проявлениями горного давления. М.: Недра, 1978. 175 с.

8. 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.

9. Круковский А.П. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива при отходе забоя горной выработки // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук.праць. Дніпропетровськ: Ліра, 2011. Вип. 17. С. 175-181.

10. Hutton D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis. McGraw-Hill, 2004. 505 p.

REFERENCES

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

2. Boiko, V. and Remez, D. (2014), "Mathematical simulation of millisecond-delay blasting for cut out spectrum of fluctuations", *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychoho vyrobnytstva*, no. 1/(13), pp. 33-40.

3. Krukovskaya, V.V. (2015), "Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations", *Geo-Technical Mechanics*, no. 121, pp. 48-99.

4. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy O.P. and Ishchenko, K.S. (2011), "Analysis of changes in the rocks stress state in the working face in the formation of cut cavities", *Vzryivnaya tehnologiya. Empirika i teoriya. Dostizheniya. Problemy. Perspektivy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Explosive technology. Empiricist and theory. Achievements. Problems. Prospects: Materials of the International science-practical conference], TulGU, Tula, RU, pp. 44-50.

5. Borovikov, V.A. and Vanyagin, I.F. (1990) *Modelirovanie deystviya vzryiva pri razrushenii gorniykh porod* [Design of action of explosion at destruction of mine rocks], Nedra, Moscow, SU.

6. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000), "The finite element method", *Butterworth-Heinemann*, Vol. 1..

7. Zorin, A.N., and Kolesnikov, V.G. (1978), *Upravlenie dinamicheskimi proyavleniyami gornogo davleniya* [Control by the dynamic displays of mine pressure], Nedra, Moscow, SU.

8. Linkov, A.M., Petuhov, I.M. and Sidorov, V.S. (1977), "About growth of cracks in a preparatory stage and at the front of the troop landing", *Trudy VNIi surveyor institute*, no. 106, pp. 46-55.

9. Krukovskiy, A.P. (2011), "Simulation of stress-strain state of marginal rock massif at the start of excavation face motion", *Problemi obchislyvalnoi mekhaniki i mltsnostl konstruktstly*, no. 17, pp. 175-181.

10. Hutton D.V. (2004), *Fundamentals of Finite Element Analysis*, McGraw-Hill.

Об авторах

Круковская Виктория Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, igtm@ukr.net.

Круковский Александр Петрович, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, igtm@ua.fm.

About the authors

Krukovska Viktoriia Viktorivna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics by N. Pjlyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net.

Krukovskiy Oleksandr Petrovych, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Deputy Director of the institute, Institute of Geotechnical Mechanics by N. Pjlyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ua.fm.

Анотація. Дослідження напружено-деформованого стану гірських порід у вибої гірничої виробки має велике значення для визначення раціональних параметрів ведення буровибухових робіт і підвищення темпів проходки. Обґрунтування схеми розташування шпурів і компенсаційної свердловини у вибої виробки можна здійснювати за допомогою математичного моделювання. В даній статті наведена математична модель перебігу зв'язаних процесів зміни напруженого стану гірського масиву при підриванні зосереджених зарядів з урахуванням дії ваги розташованих вище порід, та нестационарної, нелінійної фільтрації газоподібних продуктів детонації. Із застосуванням методу скінченних елементів виконано розрахунок поля напружень, зон непружних деформацій і тиску газу для різних схем розташування зарядів у вибої підготовчої виробки з випереджальною компенсаційною свердловиною та без неї. Показано, що за час буріння шпурів та установки зарядів ВР, приконтурні породи розвантажуються від гірського тиску. Наявність випереджальної свердловини збільшує глибину розвантаженої зони у вибої виробки. В результаті дії вибуху змінюється розподіл напружень в породному масиві: навколо

зарядів утворюються зони повністю зруйнованих і порушених порід, області підвищеної тріщинуватості, заряди ВР оточені зоною непружних деформацій. При відсутності компенсаційної свердловини зона непружних деформацій не виходить на поверхню вибою. Якщо у вибої виробки знаходиться компенсаційна свердловина, зона непружних деформацій навколо зарядів з'єднується з поверхнею свердловини під час вибуху двох зарядів. При підриванні чотирьох зарядів ВР в площині поздовжнього перерізу виробки зона непружних деформацій – зруйновані породи – простягається від зарядів до поверхні свердловини та вибою. Розрахунок розмірів порожнини руйнування при підриванні зарядів ВР підтверджує отримані висновки. Щоб досягнути такого ж ефекту без компенсаційної свердловини, необхідно збільшити радіус зарядів. Таким чином, застосування компенсаційної свердловини забезпечує посунання вибою виробки меншій потужності зарядів ВР.

Ключові слова: напружений стан породного масиву, буровибуховий спосіб проходки, чисельне моделювання зв'язаних процесів.

Annotation. The study of the stress-strain state of rocks in the roadway face is of great importance for determining rational parameters for drilling-and-blasting operations and increasing rates of the working drivage. A certain layout of blastholes and compensation boreholes in the roadway face can be substantiated by mathematical modelling. In this article, a mathematical model is presented, which describes coupled processes of changing of the rock stress state during explosion of the concentrated charges with taking into account weight of overlying rocks and unsteady, nonlinear filtration of gaseous detonation products. With the help of finite element method, stress field, zones of inelastic deformations and gas pressure were calculated for different schemes of the charge layout in the face of the preparatory roadway with and without pilot compensation borehole. It is shown that the edge rocks are unloaded from rock pressure during drilling blast-holes and installing explosive charges. The presence of a pilot borehole increases depth of the unloaded zone in the roadway face. As a result of the explosion, the stress distribution is changed in the roadway face: zones of completely destroyed and disturbed rocks and with increased fracturing are formed around the charges, and explosive charges are surrounded by an inelastic deformation zone. In case of no compensation borehole, this zone of inelastic deformation does not reach the face surface. In the roadway face with compensation borehole, zone of inelastic deformation around the charges is connected with the face surface when two charges are exploded. When four explosive charges are exploded in the plane of the longitudinal section of the roadway, zone of inelastic deformations — the fractured rocks — extends from charges to the surfaces of the borehole and roadway face. The calculation of the fracture cavity size during the explosion of charges confirms the findings. In order to achieve the same effect without compensation borehole, it is necessary to increase radius of the charges. Therefore, use of the pilot compensation borehole ensures the roadway face drivage with a lower explosive charge power.

Keywords: stress state of rocks, drilling-and-blasting operations, numerical simulation of coupled processes.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2018

Рекомендовано до друку чл.-кор. НАН України Е.І. Єфремовим