

УДК 622.26:622.235.001.57

<https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.006>

## УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТКИ С АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

А.П. Круковский<sup>1\*</sup>, В.В. Круковская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,  
г. Днепр, Украина

\*Ответственный автор: e-mail: igtm@ukr.net

## STABILITY OF ANCHORED MINE DURING DRILLING-AND- BLASTING OPERATIONS

O.P. Krukovskyi<sup>1\*</sup>, V.V. Krukovska<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine, Dnipro,  
Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: igtm@ukr.net

### ABSTRACT

**Purpose.** Numerical simulation of rock deformation during explosion of explosive charges in the mine face with anchor support, an analysis of the effect of explosive action on the stress state of marginal rocks and the operability of the roof bolting.

**Methods.** By the finite element method, coupled non-stationary problems were solved: elastoplastic deformation of rocks and filtration of methane and gaseous detonation products in the disturbed region.

**Findings.** The calculation of the stress field, zones of inelastic deformations and gas pressure in the face of the mine with anchor support were made for geological and mining conditions for the gutter of the 5th eastern sloping wall of the Samsonovskaya-Zapadnaya mine. The analysis of the changes in the geomechanical and filtration parameters in the face of the mine with the anchor support during its driving with the blasting method was performed. It is shown that during the drilling of holes and the installation of explosive charges, the contour rocks are unloaded from rock pressure; the coal seam is partially degassed. As a result of the explosion, the stress distribution in the mine face and the roof changes. The zone of completely destroyed rocks is formed around the charges. It spreads down to the face surface. The moment in time when the rocks in the mine roof are not yet unloaded from rock pressure is favorable for the installation of the next row of anchor supports.

**Originality.** For the first time, parameters of the stress-strain state of the rocks and construction of the rock-bolt bridge are calculated in a technological cycle of setting the roof bolts during blasting operations.

**Practical implications.** It is shown that the stability of the mine working is ensured with the timely installation of anchors and compliance with the anchoring technology. In this case, the host rocks will be preserved intact even during blasting operations.

**Keywords:** roof bolting, stress state of rocks, drilling-and-blasting operations, stability of the roadway

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении выработок буровзрывным способом взрывы зарядов ВВ оказывают значительное динамическое воздействие на горные породы вблизи контура выработки [1]. В момент взрывания зарядов в массиве начинает распространяться волна сжатия, накладывая на существующее поле напряжений дополнительные напряжения, вызванные взрывом. В результате этих воздействий снижается устойчивость породных обнажений, возрастают деформации пород и нагрузки на крепь выработок. В этом случае возникает вопрос выбора такого вида крепления, которое позволяло бы противодействовать двойному воздействию сил горного давления и взрыва шпуровых зарядов.

Анкерная крепь (АК) обеспечивают надежность длительной эксплуатации подготовительных и капитальных выработок в самых разнообразных условиях применения [2, 3]. Для оценки влияния взрыва на устойчивость горной выработки с АК, на способность этого вида крепления удерживать породы кровли в ненарушенном состоянии необходимо исследовать изменение поля напряжений вокруг забоя выработки с анкерной крепью перед, в момент и после взрывания зарядов ВВ. В связи с этим целью работы является численное моделирование деформирования породного массива при взрыве зарядов ВВ в забое горной выработки с анкерной крепью, анализ влияния взрывного воздействия на напряженное состояние приконтурных пород и работоспособность анкерной крепи.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вентиляционный ходок 5 восточной уклонной лавы пласта  $k_2^H$ , горизонт 956 м, шахта «Самсоновская-Западная» ПАО «Краснодонуголь», проводился по выбросоопасному угольному пласту сложного 4-пачечного строения, табл. 1. Разделяющие прослой угольного пласта – аргиллит мягкий, рыхлый. В тектоническом отношении участок спокойный, расположен в донной части Лутугинской котловины. Угол падения пласта – 3-6°. Глубина проведения выработки – 1150-1160 м.

Угольный пласт  $k_2^H$  и пропласток  $k_2^B$  опасны по внезапным выбросам угля и газа, песчаники опасны по выбросам породы и газа, поэтому способ проведения выработки – буровзрывной, в режиме сотрясательного взрывания. Схема расположения шпуров представлена на рисунке 1. Тип применяемого взрывчатого вещества – П-5; 13П, величина заряда каждого шпура – 0,6-0,9 кг, взрывание производится за 1 прием. Количество шпуров – 18 по углю и 18 по породе, глубина – 2,0 м. Подвигание забоя – 1,8 м. 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.

Таблица 1. Свойства пород

Наименование пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Коэффициент крепости	Природная газоносность, м <sup>3</sup> /т
Песчаник	68-89	7-9	7-9	2-2,5
Аргиллит	24-38	3-4	3-4	–
Алевролит	42-67	3-5	4-7	–
Угольный пропласток $k_2^B$	–	–	1-2	20-25
Угольный пласт $k_2^H$	–	–	1-1,5	20-25

Вентиляционный ходок 5 восточной уклонной лавы крепился анкерной крепью по схеме – усиленная АК с мощными перемычками, устанавливаемыми через 20 м, рисунок 2.

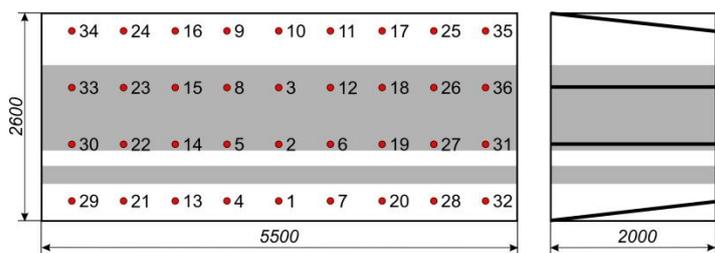


Рисунок 1. Схема расположения шпуров

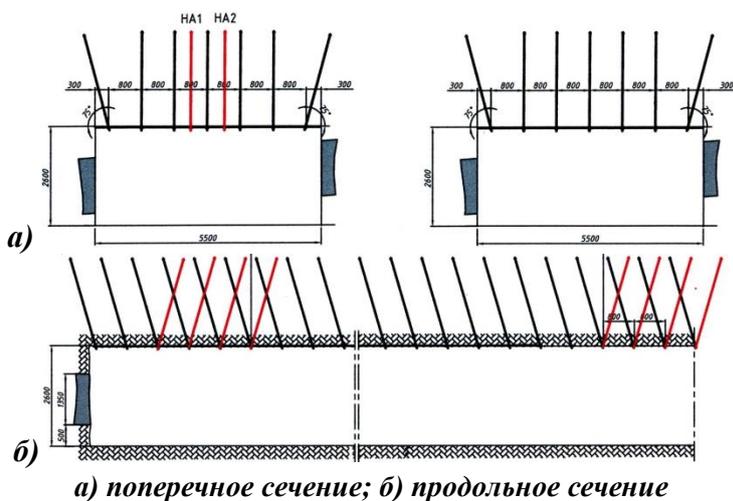


Рисунок 2. Схема установки АК

### 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее авторами был разработан метод расчета для исследования состояния породного массива вокруг горной выработки с анкерной крепью при ее проведении буровзрывным способом [4]. Решались связанные нестационарные задачи [4, 5]:

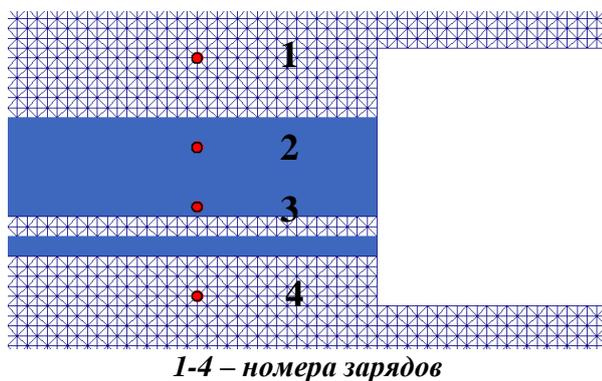
- упругопластического деформирования породного массива в окрестности горной выработки с учетом веса вышележащих пород, воздействия от взрыва сосредоточенных зарядов и давления газообразных продуктов детонации;
- фильтрации метана и газообразных продуктов детонации в нарушенной области, определяемой в зависимости от значений компонент тензора главных напряжений в конкретной точке исследуемой области породного массива.

Этот метод и метод конечных элементов [6, 7] применялись для решения поставленной задачи. В качестве начальных условий задано распределение напряжений, вызванных весом вышележащих пород, пластовое давление метана в угольном пласте и пропластке. Граничные условия – запрещены вертикальные перемещения на горизонтальных границах внешнего контура и горизонтальные перемещения на вертикальных границах внешнего контура, задано атмосферное давление на контуре выработки.

Взрывание зарядов производилось на 40-й временной итерации, чтобы учесть разгрузку приконтурных пород от горного давления, которая происходит после подвигания забоя во время бурения шпуров и установки зарядов ВВ. В момент взрывания в области взрыва задается детонационное давление [8]. При расчете учитывается эффект отражения взрывной волны от свободной поверхности забоя выработки.

Для оценки напряженного состояния используется параметр, характеризующий степень разнокомпонентности поля напряжений,  $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – максимальная и минимальная компоненты главных напряжений;  $H$  – высота вышележащих горных пород;  $\gamma$  – их удельный вес.

Конечно-элементная сетка для продольного сечения выработки показана на рисунке 3.

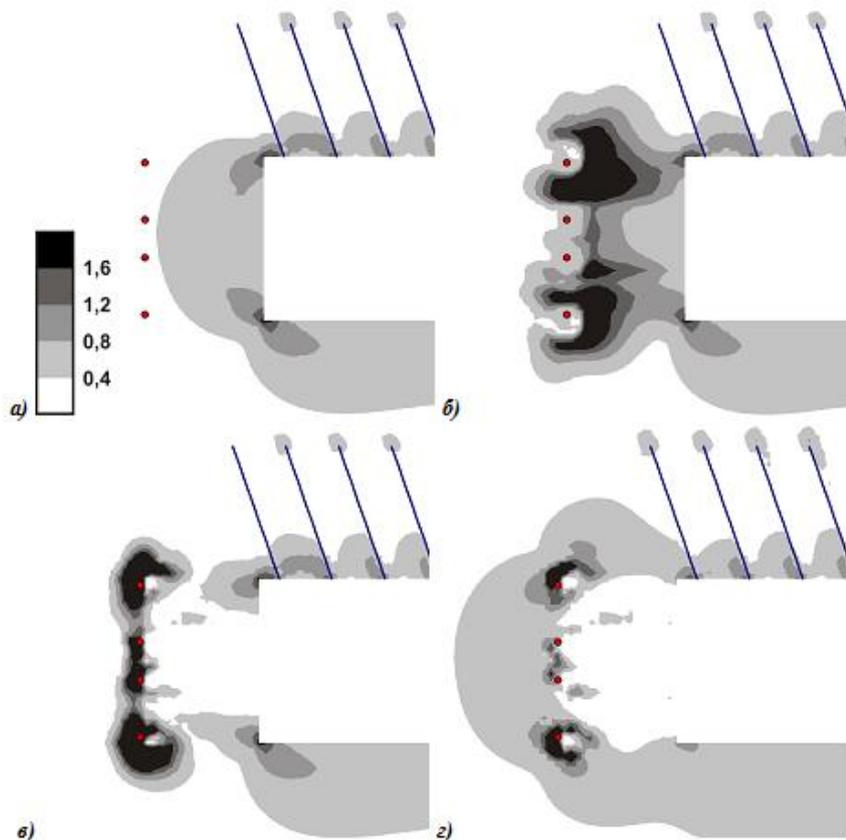


1-4 – номера зарядов

Рисунок 3. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При выполнении расчета получим распределение значений компонент тензора главных напряжений и параметры зоны неупругих деформаций. На рисунке 4 показано распределение значений параметра  $Q^*$ , на рисунке 5 – зоны неупругих деформаций.

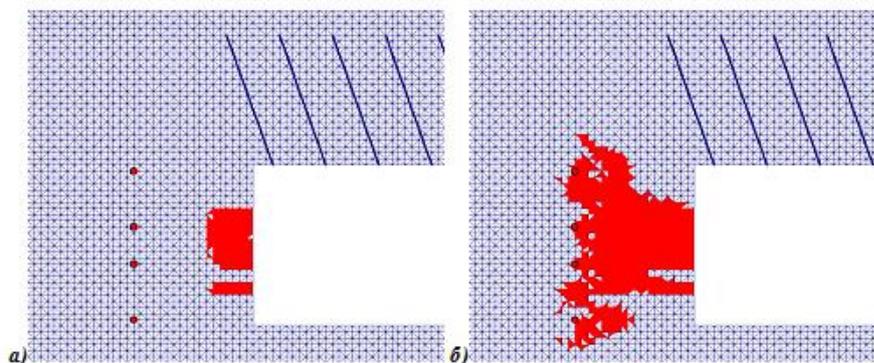


*а) перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва;  
в) на следующей итерации после взрывания; г) через 40 итераций.*

**Рисунок 4. Распределение значений параметра  $Q^*$**

Видно, что в результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое и кровле выработки. Вокруг зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, распространяющаяся вплоть до поверхности забоя выработки, рисунок 5 б. Вокруг первого и четвертого зарядов расположены зоны сильно нарушенных пород (темно-серый цвет,  $0,8 < Q^* < 1,2$ ), далее – зона повышенной трещиноватости (светло-серый цвет,  $0,4 < Q^* < 0,8$ ), рисунок 4 б. Образованная в результате взрывания зарядов полость видна на рисунке 4 в, на следующей временной итерации. Концентрация напряжений в массиве вокруг вновь сформированного забоя в этот момент очень велика, параметр  $Q^* > 1,6$ . В кровле выработки, наоборот, породы еще не разгружены от

горного давления и здесь параметр  $Q^* < 0,4$ . Этот момент времени благоприятен для установки следующего ряда анкерной крепи.



а) перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва.

Рисунок 5. Зоны неупругих деформаций

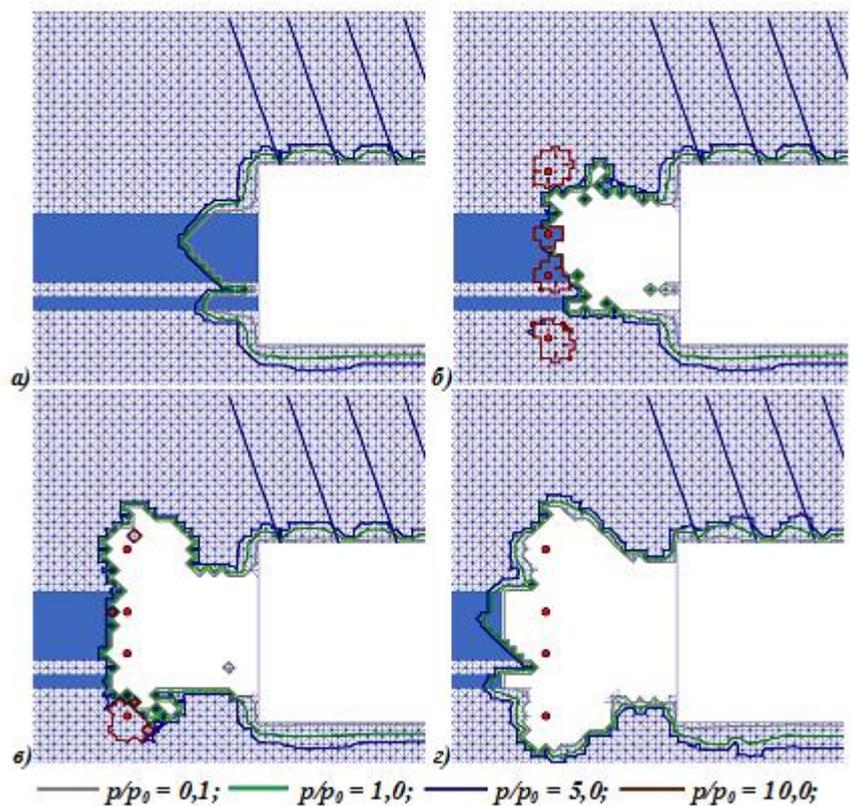
Расчетное подвигание забоя составляет примерно 1,8 м.

С течением времени постепенно происходит перераспределение поля напряжений: область с  $Q^* > 1,6$  уменьшается, а зона повышенной трещиноватости, в которой  $0,8 < Q^* < 1,2$ , распространяется далеко вглубь массива, рисунок 4 г. Если проводить установку следующих рядов АК в это время, с запаздыванием, то АК уже не сможет вернуть вмещающему массиву утраченную монолитность, и не будет сформировано качественное породно-анкерное перекрытие. Максимальные значения разнокомпонентности поля напряжений наблюдаются в области первого и четвертого зарядов, в аргиллите, как более прочной по сравнению с углем среде, рисунок 4 г.

В течение всего расчетного времени в кровле выработки, в зоне анкерного крепления, породы сохранены в природном, ненарушенном состоянии, значения параметра  $Q^*$  находятся в допустимых пределах, неупругие деформации в заанкерванной области не развиваются. Устойчивость выработки обеспечивается даже в условиях буровзрывного способа проходки.

Изменение во времени распределения давления газа в забое выработки показано на рисунке 6. Перед взрыванием зарядов угольный пласт в забое выработки постепенно дегасируется, давление метана в этой области снижается, рисунок 6 а.

В результате взрывания зарядов 1-4 вокруг каждого из них образуется зона полностью разрушенных пород, эти зоны объединяются и формируют единую область, проницаемость внутри которой очень велика. Из рисунков 6 б-г видно, что относительное давление газа в разрушенной области меньше 0,1 – т.е. практически равно давлению воздуха в выработке. Давление газообразных продуктов детонации в центрах взрывов очень высоко в момент взрывания, рисунки 6 б-в, но на следующих итерациях, рисунок 6 г оно падает.



а) перед взрыванием зарядов; б) в момент взрыва;  
в) на следующей итерации после взрывания; г) через 40 итераций

Рисунок 6. Изобары относительного давления газа

Полость разрушения при взрыве зарядов ВВ, показанная на рисунках б б-г, построена по критерию принадлежности конечного элемента области неупругих деформаций и превышения градиентами давления газа критических значений. Можно видеть, что при взрыве заряды ВВ окружает область высокого давления газообразных продуктов детонации.

Применение метода расчета, который был применен для выполнения, позволило обосновать такие параметры технологии АК, как отставание ряда анкеров от забоя [9], плотность установки анкеров и угол наклона на забой, повысить устойчивость выработок, проводимых буровзрывным способом, рисунок 7, сократить затраты на их проведение и поддержание в течение всего срока службы, снизить трудоемкость операций по поддержанию кровли на сопряжениях лав с выемочными штреками и повысить безопасность труда горнорабочих.

## 5. ВЫВОДЫ

С применением разработанного авторами метода расчета для исследования состояния породного массива вокруг горной выработки с анкерной крепью при ее проведении буровзрывным способом и метода конечных элементов выполнен расчет поля напряжений, зон неупругих деформаций и давле-

ния газа для в забое горной выработки с анкерной крепью для горно-геологических и горнотехнических условий проведения вентиляционного ходка 5 восточной уклонной лавы пласта  $k_2^H$ , шахты «Самсоновская-Западная».

Проведен анализ изменения геомеханических и фильтрационных параметров в забое выработки с анкерной крепью при ее проходке буровзрывным способом. Показано, что за время бурения шпуров и установки зарядов ВВ, приконтурные породы разгружаются от горного давления, угольный пласт частично дегасируется. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое и кровле выработки. Вокруг зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, распространяющаяся вплоть до поверхности забоя. Момент времени, когда породы в кровле выработки еще не разгружены от горного давления и значение параметра  $Q^*$  не превышает 0,4, благоприятен для установки следующего ряда анкерной крепи.



*Рисунок 7. Состояние вентиляционного ходка 5 восточной уклонной лавы шахта «Самсоновская-Западная»*

С течением времени зона повышенной трещиноватости распространяется далеко вглубь массива. Если проводить установку следующих рядов анкерной крепи в это время, с запаздыванием, то АК уже не сможет вернуть вмещающему массиву утраченную монолитность, качественное породно-анкерное перекрытие не будет сформировано.

В течение всего расчетного времени в кровле выработки, в зоне анкерного крепления, породы сохранены в природном, ненарушенном состоянии, значения параметра  $Q^*$  находятся в допустимых пределах, неупругие деформации в заанкерванной области не развиваются. Таким образом, при своевременной установке анкеров и соблюдении технологии опорно-анкерного крепления обеспечивается устойчивость выработки, вмещающие породы сохраняются в ненарушенном состоянии даже при ведении буровзрывных работ [9].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамаюнов, В.В., Друзко, В.П., Гнездилов, В.Г. и др. (2004). О направлении развития технологии сооружения горизонтальных и наклонных горных выработок в сложных горно-геологических условиях. *Геотехническая механика*. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, (51), 92–102.
2. Булат А.Ф., Виноградов, В.В. (2002). *Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт*. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 372 с.
3. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги. (2014). К.: Мінвуглепром України, 83 с.
4. Круковська, В.В.; Круковский, О.П., Ищенко, К.С. (2016) Спосіб дослідження стану гірського масиву навколо гірничої виробки з анкерним кріпленням при її проведенні буропідричним способом. пат. 107070 UA, u 2015 09 580 МПК E21D 11/00, заявл. 05.10.2015, опубл. 25.05.2016, бюл. № 10/2016.
5. Круковская, В.В. (2015) Моделирование связанных процессов, происходящих в угленосном массиве при ведении горных работ. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, ИГТМ НАН Украины, (121), 48–99.
6. Zienkiewicz, O.C. (2000). *The finite element method*. Butterworth-Heinemann, T. 1, 690 p.
7. Hutton, D.V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. McGraw-Hill, 505 p.
8. Ефремов, Э.И., Харитонов, В.Н., Семенюк, И.А. (1979). *Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах*. М.: Недра, 253 с.
9. Круковский, А.П., Круковская, В.В., Вельбовец, С.Н. (2012). Исследование напряженного состояния незакрепленной части кровли над забоем выработки с анкерной крепью при ее проведении буровзрывным способом. *Perspetywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2012: Materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji*. Przemysl: Nauka i studia, (21), 11–15.

## REFERENCES

1. Gamayunov, V.V., Druczko, V.P., Gnezdilov, V.G. i dr. (2004). O napravlenii razvitiya tekhnologii sooruzheniya gorizonta`lny`kh i naklonny`kh gorny`kh vy`rabortok v slozhny`kh gorno-geologicheskikh usloviyakh. *Geotekhnicheskaya mekhanika*. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy`, (51), 92–102.
2. Bulat, A.F., Vinogradov, V.V. (2002) *Roof bolting support of mine workings of coal mines*, Dnepropetrovsk, Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine.
3. *System to provide reliable and safe operation of the mine workings with roof bolting. The general technical requirements* (2014), Kiev, Ministry of coal industry of Ukraine.
4. Krukovska, V.V.; Krukovskyi, O.P., Ishchenko, K.S. (2016) *Sposib doslidzhenia stanu hirskoho masyvu navkolo hirnychoi vyrobky z ankernym kriplenniam pry yii provedenni buropidryvnyim sposobom*. pat. 107070 UA, u 2015 09 580 MPK E21D 11/00, zaiavl. 05.10.2015, opubl. 25.05.2016, biul. № 10/2016.
5. Krukovska, V.V. (2015) Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations, *Geotechnical Mechanics*, (121), 48–99.
6. Zienkiewicz, O.C. (2000). *The finite element method*. Butterworth-Heinemann, T. 1, 690 p.
7. Hutton, D.V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. McGraw-Hill, 505 p.

8. Efremov, E.I., Kharitonov, V.N., Semenyuk, I.A. (1979). *Vzryvnoe razrushenie vy brosoopasnykh porod v glubokikh shakhtakh*. M.: Nedra, 253 p.

9. Krukovskiy, O.P., Krukovska, V.V. Velbovets, S.N. (2012) *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya nezakreplennoy chasti krovli nad zaboem vyirabotki s ankernoy krepyu pri ee provedenii burovzryivnyim sposobom*”, Proc. of the VIII International scientific and practical conference “*Perspetywiczne opracowania sa nauka i technikami*”, Przemysl, Nauka i studia, (21), 11–15.

#### ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Чисельне моделювання деформування породного масиву при вибуху зарядів ВР у вибої гірничої виробки з анкерним кріпленням, аналіз впливу вибуху на напружений стан приконтурних порід і працездатність анкерного кріплення.

**Методика.** З використанням методу скінченних елементів вирішені зв'язані нестационарні задачі пружно-пластичного деформування породного масиву в околі гірничої виробки і фільтрації метану і газоподібних продуктів детонації в порушеній області.

**Результати.** Розрахунок поля напружень, зон непружних деформацій і тиску газу в забої гірничої виробки з анкерним кріпленням виконано для гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов проведення вентиляційного ходка 5 східної похилої лави шахти «Самсонівська-Західна». Виконано аналіз зміни геомеханічних і фільтраційних параметрів в забої виробки з анкерним кріпленням при її проведенні буропідливним способом. Показано, що за час буріння шпурів і установки зарядів ВВ, приконтурні породи розвантажуються від гірського тиску, вугільний пласт частково дегазується. В результаті дії вибуху змінюється розподіл напружень у вибої і в покрівлі виробки. Навколо зарядів утворюється зона повністю зруйнованих порід, що розповсюджується аж до поверхні вибою. З плином часу зона підвищеної тріщинуватості поширюється далеко вглиб масиву. Момент часу, коли породи в покрівлі виробки ще не розвантажені від гірського тиску, сприятливий для установки наступного ряду анкерного кріплення.

**Наукова новизна.** Вперше виконано розрахунок параметрів напружено-деформованого стану масиву і конструкції породно-анкерного перекриття в технологічному циклі установки анкерного кріплення при веденні буропідливних робіт.

**Практична значимість.** Показано, що при своєчасній установці анкерів і дотриманні технології опорно-анкерного кріплення забезпечується стійкість виробки, породи, що її вміщують, зберігаються в непорушеному стані навіть при веденні буропідливних робіт.

**Ключові слова:** анкерне кріплення, напружений стан породного масиву, буропідливний спосіб проходки, стійкість виробки

## ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Численное моделирование деформирования породного массива при взрыве зарядов ВВ в забое горной выработки с анкерной крепью, анализ влияния взрывного воздействия на напряженное состояние приконтурных пород и работоспособность анкерной крепи.

**Методика.** С использованием метода конечных элементов решены связанные нестационарные задачи упругопластического деформирования породного массива в окрестности горной выработки и фильтрации метана и газообразных продуктов детонации в нарушенной области.

**Результаты.** Расчет поля напряжений, зон неупругих деформаций и давления газа в забое горной выработки с анкерной крепью выполнен для горно-геологических и горнотехнических условий проведения вентиляционного ходка 5 восточной уклонной лавы шахты «Самсоновская-Западная». Выполнен анализ изменения геомеханических и фильтрационных параметров в забое выработки с анкерной крепью при ее проходке буровзрывным способом. Показано, что за время бурения шпуров и установки зарядов ВВ, приконтурные породы разгружаются от горного давления, угольный пласт частично дегазируется. В результате действия взрыва изменяется распределение напряжений в забое и кровле выработки. Вокруг зарядов образуется зона полностью разрушенных пород, распространяющаяся вплоть до поверхности забоя. С течением времени зона повышенной трещиноватости распространяется далеко вглубь массива. Момент времени, когда породы в кровле выработки еще не разгружены от горного давления, благоприятен для установки следующего ряда анкерной крепи.

**Научная новизна.** Впервые выполнен расчет параметров напряженно-деформированного состояния массива и конструкции породно-анкерного перекрытия в технологическом цикле установки анкерной крепи при ведении буровзрывных работ.

**Практическая значимость.** Показано, что при своевременной установке анкеров и соблюдении технологии опорно-анкерного крепления обеспечивается устойчивость выработки, вмещающие породы сохраняются в ненарушенном состоянии даже при ведении буровзрывных работ.

**Ключевые слова:** анкерное крепление, напряженное состояние породного массива, буровзрывной способ проходки, устойчивость выработки

## ABOUT AUTHORS

Krukovskyi Olexandr Petrovych, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Deputy Director of the institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: igtm@ukr.net.

Krukovska Viktoriia Viktorivna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: vikakrukk@gmail.com.