

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА ВЫРАБОТОК НА СМЕЩЕНИЯ КОНТУРА

**А. В. Солодянкин, А. З. Прокудин, М. А. Выгодин,
К. В. Кравченко, И. В. Мясников**

Национальный технический университет «Днепровская политехника»
просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина.
E-mail: alex.solodyankin@gmail.com

Изучено влияние параметров упрочненного слоя на смещения приконтурного массива при заполнении закрепного пространства выработок для сложных условий эксплуатации шахт Западного Донбасса. Разработана численная модель породного массива, вмещающего одиночную протяженную выработку применительно к условиям шахты имени Героев космоса для исследования параметров комбинированной крепи с тампонажем закрепного пространства. Выполненные численные исследования показали, что смещения породного контура выработки уменьшаются с увеличением толщины и прочности твердеющей смеси. Полученные значения смещений при различных соотношениях толщины и прочности слоя затвердевшего материала, позволяют прогнозировать состояние выработки и оптимизировать параметры комбинированной крепи за счет увеличения шага установки рам. Прочность твердеющего материала при необходимости может быть увеличена путем повышения прочности компонентов смеси и марки цемента, а также за счет дисперсного армирования полимерными волокнами.

Ключевые слова: устойчивость выработки, рамная крепь, численные исследования, заполнение закрепного пространства, тампонаж, порода.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗМІЩЕНОГО ШАРУ ЗАКРІПНОГО ПРОСТОРУ ВИРОБОК НА ЗМІЩЕННЯ КОНТУРУ

**О. В. Солодянкин, О. З. Прокудин, М. О. Вигодін,
К. В. Кравченко, І. В. Мясников**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.
E-mail: alex.solodyankin@gmail.com

Для підтримки капітальних виробок в складних умовах експлуатації вугільних шахт Західного Донбасу застосовується металеве комбіноване кріплення з тампонажем закріпного простору. Вивчено вплив параметрів зміщеного шару закріпного простору виробок на зміщення породного контуру. Дослідження виконувались за допомогою чисельного методу. Для розрахунків використаний програмний продукт «Phase2» канадської лабораторії Rocscience. Розроблено плоску чисельну модель породного масиву, що вміщує одиночну протяжну виробку для умов шахти імені Героїв космосу ПАО «ДТЕК Павлоградвугілля». Результати розрахунку контрольної моделі за зміщеннями породного контуру відповідали даним шахтних вимірювань, що підтвердило адекватність моделі реальними умовам. Для розрахунків були обрані різні значення шагу встановлення

кріплення, товщини шару та міцності матеріалу для заповнення закріпного простору. Результати виконаних досліджень показали, що зміщення породного контуру виробки зменшуються зі збільшенням товщини і міцності матеріалу закріпного простору. Однак, здимання порід при застосуванні повного заповнення закріпного простору знижується несуттєво. Для суттєвого зниження зміщень порід підосви ефективним засобом є встановлення анкерів в боках та підосві виробки. В такій постановці чисельні дослідження для розглянутих умов виконані вперше. Отримано значення зміщень при різних співвідношеннях товщини і міцності шару затверділого матеріалу, дозволяють прогнозувати стан виробки і оптимізувати параметри комбінованого кріплення за рахунок збільшення кроку установки рам. Міцність матеріалу, що твердіє при необхідності може бути збільшена шляхом підвищення міцності компонентів суміші і марки цементу. Також підвищення міцності матеріалу може бути досягнуте за рахунок дисперсного армування полімерними волокнами.

Ключові слова: стійкість виробки, рамне кріплення, чисельні дослідження, заповнення закріпного простору, тампонаж, порода.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Опыт сооружения и эксплуатации шахт в сложных горно-геологических условиях свидетельствует, что для обеспечения эксплуатационного состояния выработок необходимо наряду с установкой крепи проводить специальные мероприятия по повышению их устойчивости.

В настоящее время на шахтах Западного Донбасса для поддержания капитальных выработок в сложных условиях применяются комбинированные крепи с тампонажем закрепного пространства. Многолетний опыт поддержания выработок на шахтах этого региона показал их высокую технологичность и эффективность [1–3]. В результате равномерного распределения нагрузки, устранения сосредоточенных усилий и перекоса более рационально используется материал крепи, снижается величина изгибающих моментов, эффективнее работают узлы податливости, появляется дополнительный несущий слой из затвердевшего материала. Несущая способность крепи в этом случае увеличивается в несколько раз.

В качестве несущей конструкции для капитальных выработок применяется крепь КШПУ с шагом установки 0,5 м и железобетонной затяжкой. Затяжка, как несущий элемент в этой конструкции малоэффективна, поскольку имеет низкую прочность, ресурсоемка, нетехнологична, формирует большое количество стыков после укладки и, фактически, выполняет при тампонаже роль опалубки. Следовательно, она может быть заменена более удобным по технологичности и транспортируемости и менее дорогим материалом, например, профнастилом



Рисунок 1 – Предлагаемая конструкция комбинированной крепи

либо иным листовым материалом (рис. 1). Поскольку в этом случае межрамное ограждение практически не работает как несущий элемент, рассмотрим влияние параметров тампонажного слоя, как искусственного каменного материала на величину смещений породного контура и размер зоны неупругих деформаций (ЗНД).

Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение влияния параметров упрочненного слоя на смещения приконтурного массива при заполнении закрепного пространства выработок.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В настоящее время при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, вмещающего выработку, часто применяют численные методы решения задач. Опыт решения различных задач в области геомеханики, свидетельствует, что наиболее эффективным инструментом численных исследований является метод конечных элементов.

Численные исследования могут выполняться любым программным пакетом, реализующим метод конечных элементов, однако предпочтительным является использование программ, разработанных специально для решения задач геомеханики. Одним из таких исследовательских инструментов является программный продукт «Phase2» [4], разработанный канадской лабораторией геомеханики Rocscience, используемый для решения широкого круга задач механики горных пород [5–9].

В рассматриваемой задаче исследуемая область представляет собой продольное или поперечное сечение выработки, с окружающим ее массивом, разбитое на плоские треугольные или четырехугольные элементы единичной толщины (конечные элементы), соединенные между собой в точках (узлах). В пределах каждого элемента массив предполагается однородным и упругим. Все виды нагрузок, действующие на исследуемую область и формирующие в ней определенное напряженно-деформированное состояние, приводятся к статически эквивалентным силам, приложенным в узловых точках. На внешнем контуре рассматриваемой области массива и на контуре выработки задаются поверхностные силы, которые в случае отсутствия внешних нагрузок, равны нулю, а перемещения узловых точек контура неизвестны.

Для полного учета неоднородности породного массива параметрам каждого элемента или группы элементов присваиваются различные значения, в том числе случайные, которые могут быть сгенерированы в соответствии с определенным законом распределения.

В расчетную схему входит исходная информация, состоящая из ряда параметров: тип и количество конечных элементов, на которые разбивается исследуемая область; общее количество узлов, образующихся при разбиении; координаты узлов; количество типов элементов с различными физико-механическими свойствами; значения физико-механических свойств, для каждой группы элементов; граничные условия, характеризующие значения напряжений и перемещений.

Возможности программы позволяют учитывать в расчете упругопластические свойства вмещающих пород, что, помимо прочего, позволяет моделировать постадийное раскрытие выработок в неупругой среде, учитывая на каждой по-

следующей стадии в качестве начальных те деформации, которые реализованы на предыдущей стадии формирования НДС.

Исследование предполагало моделирование и анализ нескольких моделей с различными переменными параметрами комбинированной крепи. Для этого первоначально была разработана «контрольная» модель, исходными параметрами которой являлись горно-геологические и горнотехнические условия, характерные для типовых капитальных выработок шахты им. Героев космоса ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь» (табл. 1).

Таблица 1 – Исходные параметры численной модели

Наименование показателя	Кол-во
Глубина заложения выработки (H), м	370
Объемный вес породного массива (γ), т/м ³	2,5
Коэффициент структурного ослабления пород (k_c)	0,3
Модуль упругости (E), МПа	6150
Коэффициент Пуассона (μ)	0,25
Прочность на одноосное сжатие ($R_{сж}$), МПа	20
Полупролет выработки (R_0), м	2,2
Тип крепи / спецпрофиль	КШПУ-17,7 / СВП -27

При этом результаты перемещений пород на контуре выработки и границы зоны неупругих деформаций (ЗНД) полученные при решении «контрольной» модели считались «эталонными», и соответствовали аналогичным величинам смещений, измеренных в шахтных условиях. Погрешность полученных численных результатов с экспериментальными данными, составила не более 10%. Конечно-элементная схема модели представлена на рис. 2, а картина перемещений и конфигурация ЗНД на рис. 3.

В дальнейшем в «контрольную» модель вносились изменения некоторых исследуемых параметров, а затем выполнялся сравнительный анализ контрольных и полученных результатов.

В качестве исследуемых параметров были выбраны следующие величины:

- ширина закрепного пространства (переборы), м – δ ;
- прочность тампонажного раствора (твердеющей смеси), МПа – $R_{сж}$;
- шаг крепи, м – $l_{кр}$.

Величина переборов δ варьировалась в пределах от 0,05...0,30 м.

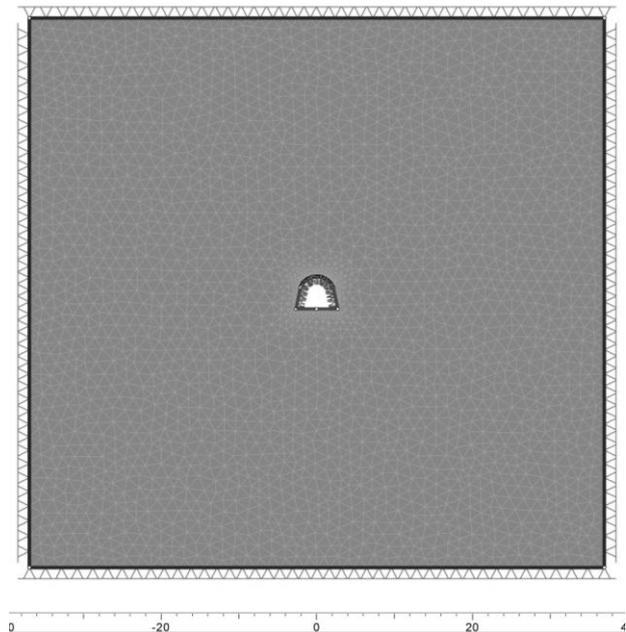


Рисунок 2 – Конечно-элементная расчетная схема

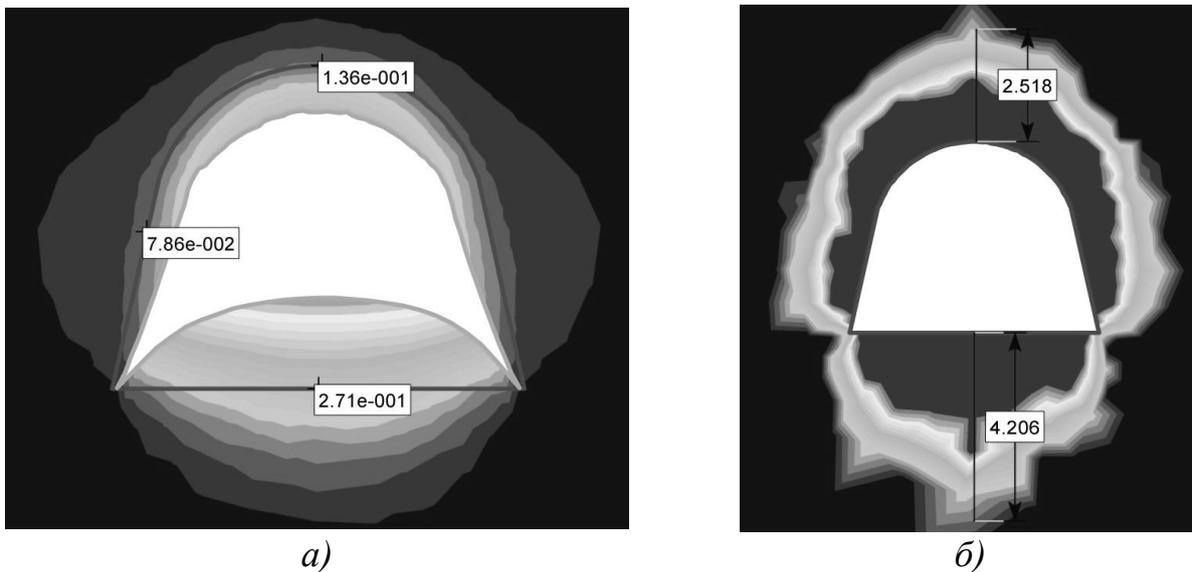


Рисунок 3 – Перемещения на контуре выработки и конфигурация ЗНД, полученные при решении задачи для «контрольной» модели

Прочностные показатели тампонажных растворов, применяемых для заполнения закрепного пространства, были приняты в соответствии с результатами исследований [10], и приведены в табл. 2. Также рассмотрен вариант заполнения пустот за крепью уплотненной породой, подаваемой с торца выработки механизированным способом по технологии, изложенной в [11].

Таблица 2 – Прочностные показатели материала заполнения закрепного пространства

№ п/п	Состав материала	Плотность γ , кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	Модуль упругости, $E \times 10^3$, МПа	Кoeff. Пуассона, μ
1.	Ц : П : Пор* = 1 : 1 : 2	1910	17,68	21	0,2
2.	Ц : П : Пор* = 1 : 3 : 0	1845	16,74	21	0,2
3.	Ц : П : Пор* = 1 : 0 : 3	2030	5,93	21	0,2
4.	Уплотненная, дробленая порода	1500	3,00	14	0,3

* – соотношение цемента, песка и породы в смеси.

Влияние шага крепи в исследуемых моделях рассматривалось при его значении равном 0,3; 0,7 и 1,0 м.

С учетом всех перечисленных изменяемых параметров было разработано и рассчитано 48 численных моделей.

Анализ результатов моделирования представлен в виде графиков на рис. 4 и 5. При построении графиков были использованы величины смещений породного контура в кровле выработки, поскольку согласно схемы деформирования породного массива [12], перемещения пород кровли являются определяющим деформационным процессом, провоцирующим в дальнейшем смещения боков и почвы.

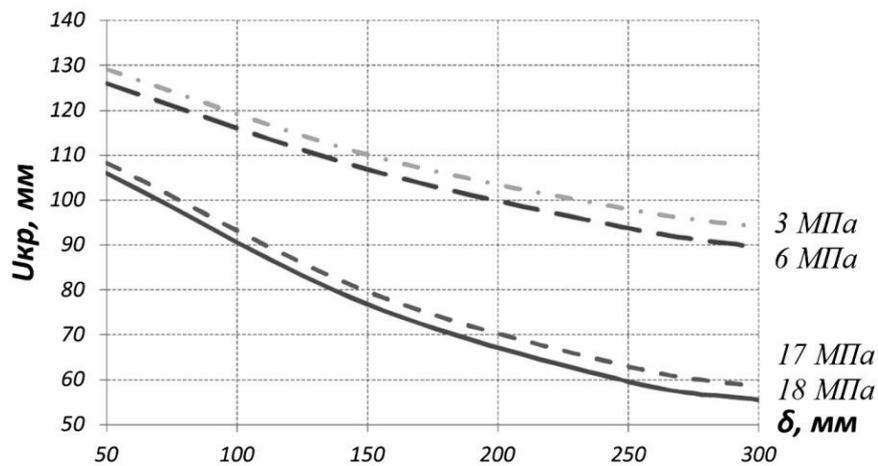


Рисунок 4 – Влияние величины переборов (толщины забутовочного слоя) на смещения породного контура в кровле выработки

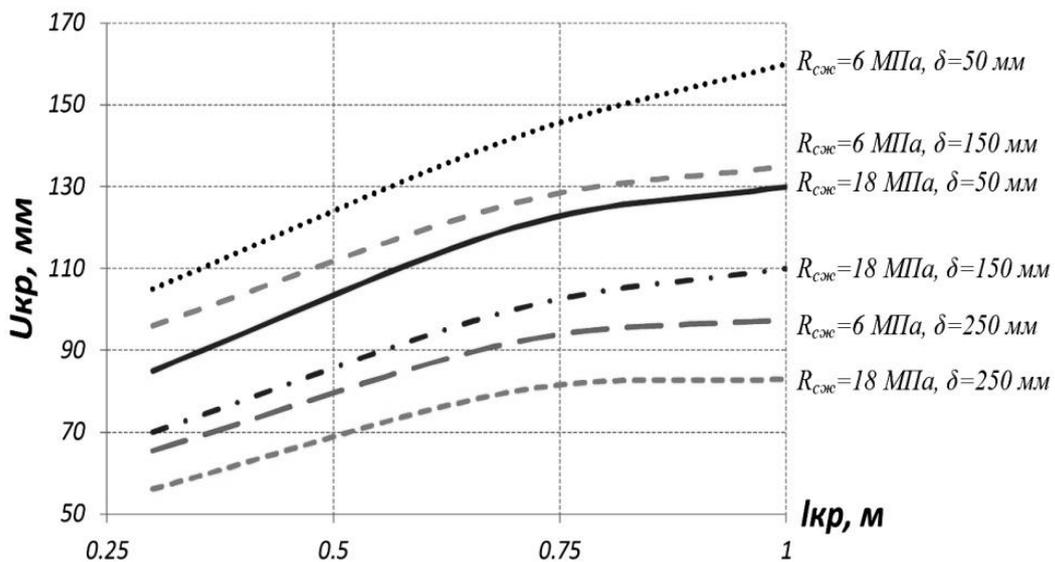


Рисунок 5 – Влияние шага рамной крепи на величину смещений контура выработки в кровле, при различных параметрах твердующего материала

Как видно из представленных графиков, с увеличением величины переборов и прочности тампонажного раствора, смещения породного контура в кровле выработки уменьшаются. При этом размер зоны неупругих деформаций практически не изменяется, что не противоречит общепринятым представлениям о деформировании массива горных пород в окрестности одиночной выработки. Следует также отметить, что смещения в почве выработки, незначительно уменьшаются по мере увеличения размеров переборов (по сути – толщины упрочненного слоя) и прочности материала закрепного пространства.

Существенно снизить пучение пород почвы можно за счет применения анкерной крепи, устанавливаемых в кровле, боках и почве выработки. Исследования, выполненные в [13], свидетельствуют, что применение почвенных анкеров значительно сокращает зону повышенной разнокомпонентности в нижней части выработки, предотвращает разгрузку этой части приконтурного массива, уменьшает зону неупругих деформаций в почве.

Согласно [13], установка трех боковых анкеров приводит к снижению величины пучения почвы на 40 %, установка трех боковых и одного почвенного – на 60 %.

Аналогичные результаты получены по результатам моделирования в [14]. Применение рамно-анкерной крепи с наличием боковых и почвенных анкеров при общем их числе в сечении 10...12 штук, позволяет снизить величину пучения пород почвы почти в 2 раза.

Повышению несущей способности комбинированной крепи и снижению смещений породного контура будет способствовать также увеличение прочности тампонажного раствора (твердеющей смеси) за счет дисперсного армирования, для чего можно использовать полимерные волокна в количестве 0,1...1 % [15].

Подтвердить полученные в результате численного моделирования значения, а также оптимизировать конструкцию комбинированной крепи и технологические параметры можно будет после проведения шахтных испытаний на экспериментальном участке выработки.

ВЫВОДЫ. Выполненные численные исследования показали, что смещения породного контура выработки уменьшаются с увеличением толщины и прочности твердеющей смеси. Работа профильного листа в разработанной численной модели, вследствие его небольшой толщины, не рассматривалась.

Полученные значения смещений при различных соотношениях толщины и прочности слоя затвердевшего материала, позволяют прогнозировать состояние выработки и оптимизировать параметры комбинированной крепи за счет увеличения шага установки рам. Прочность твердеющего материала при необходимости может быть увеличена традиционным способом – повышением прочности компонентов смеси и марки цемента, а также за счет дисперсного армирования полимерными волокнами в количестве 0,1...1%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шашенко А.Н., Смирнов А.В., Солодянкин А.В. Пучение пород почвы в выработках угольных шахт. Днепропетровск: ЛизуновПрес, 2015. 256 с.
2. Ресурсозберігаючі технології управління стійкістю протяжних виробок вугільних шахт. Р.М. Терещук, С.М. Гапеев, Н.В. Хозяйкина, В.В. Коваленко. Дніпропетровськ : НГУ, 2016. 181 с.
3. Терещук Р.Н., Наумович А.В. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок глубоких угольных шахт. Днепропетровск : НГУ, 2016. 181 с.
4. Phase². Finite Element Analysis for Excavations and Slopes. version 8.0 // Режим доступа: <https://www.roscience.com/products/3/Phase2>.
5. Гапеев С.Н., Олексюк А.Б., Логунова А.О. Определение рационального места заложения вентиляционной магистрали с использованием численных моделей. *Науковий вісник НГУ*. 2011. № 6. С. 60–65.
6. Шашенко А.Н., Кравченко К.В., Король А.Ю. Численное моделирование потери устойчивости пород почвы в горных выработках глубокого заложения. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 9 (12). С. 105–112.
7. Геомеханическая оценка эффективности крепления и охраны участков выработок в условиях шахты «Партизанская» ГП «Антрацит». Е.А. Сдвижкова,

И.Н. Попович, И.В. Дудка, О.А. Кузьева. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2014. Вип. 4 (87). С. 129–133.

8. Солодянкин А.В., Янкин А.Е. Повышение качества оконтуривания вертикальных стволов при проходке буровзрывным способом. *Розробка родовищ*. 2014. Т. 8. С. 229–237.

9. Babets D.V., Sdvyzhkova O.O., Larionov M.H., Tereshchuk R.M. "Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2017, no. 2. pp. 58–64.

10. Перспективы использования шахтной породы в твердеющих смесях для обеспечения устойчивости капитальных выработок. С.В. Мкртчян, В.В. Коваленко, М.А. Выгодин, В.С. Гаркуша. *Уголь Украины*. 2016. № 1. С. 28–32.

11. Халимендик О.В., Вигодин М.О., Солодянкин О.В. Технологія заповнення закріпного простору демпферним забучуванням при проведенні гірничих виробок. *Збірник наукових праць НГУ*. Дніпро: НГУ, 2018. № 54. С. 261–270.

12. Выгодин М.А., Евтушенко В.В. Совершенствование крепей капитальных горных выработок. *Науковий вісник НГА України*. 1999. № 4. С. 27–30.

13. Применение конструкций анкерной крепи как технологического способа снижения метанообильности горных выработок. В.В. Виноградов, А.П. Круковский, В.В. Круковская. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. праць*. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2007. Вип. 11. С. 30–37.

14. O. Solodyankin, O. Hryhoriev, I. Dudka, S. Mashurka. Criterion to select rational parameters of supports to reduce expenditures connected with construction and maintenance of development working. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017, no 2. pp. 19–27.

15. Гаркуша В.С., Воронин С.А., Мкртчян С.В. Перспективы использования извлекаемой породы при обеспечении устойчивости капитальных выработок шахт компании «ДТЭК Павлоградуголь». Днепр: Литограф, 2016. 88 с.

INVESTIGATION INFLUENCE OF THE HARDENED MATERIAL PARAMETERS FOR FILLING THE VOID FOR SUPPORT ON THE ROCK CONTOUR DISPLACEMENTS

A. Solodyankin, A. Prokudin, M. Vygodin, K. Kravchenko, I. Myasnikov

National TU Dnipro Polytechnic

prosp. D. Yavornytsky, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: alex.solodyankin@gmail.com

To maintain the long-term roadway in the difficult exploitation conditions of the coal mines of the Western Donbass, a metal combined support with a plugging of the void for support is used. **Purpose.** The research is to study the influence of the parameters of the hardened material for filling the void for long-term roadway support on the displacements of the rock contour. **Methodology.** The studies were performed using a numerical method. For calculations, the software product "Phase-2" of the Canadian laboratory Rocscience was used. A flat numerical model of a rock mass containing a single extended long-term roadway for the conditions of the Geroev Kosmosa mine of PJSC "DTEK Pavlogradugol" has been developed. **Results.** The results of calculating

the displacement of the rock contour of the control model corresponded to the data of the mine measurements, which confirmed the adequacy of the model to real conditions. For the calculations, different values of the step of the support installation, the thickness of the material layers and the strength of the material for filling the void for support were chosen. The results of the performed studies have shown that the displacement of the rock contour decreases with increasing thickness and strength of the material for filling the void for support. However, the floor heaving with complete filling the void for support is reduced insignificantly. For a significant decrease floor heaving, an effective tool is the installation of anchors in the sides and floor. **Originality.** In this formulation, numerical studies for the conditions under consideration were carried out for the first time. **Practical value.** The obtained values of the displacements at different thickness ratios and the strength of the hardened material layer it possible to predict the long-term roadway state and optimize the parameters of the combined support by increase the installation step of the support frames. **Conclusions.** The strength of the hardening material can be increased by increasing the strength of the mixture components and the cement grade. Also, an increase in the strength of the material can be achieved by dispersed reinforcement with polymeric fibers. References 15, tables 2, figures 5.

Key words: stability of long-term roadway, frame support, numerical research, filling the void for support, plugging, rock.

REFERENCES

1. Shashenko, A.N., Solodyankyn, A.V., Smirnov, A.V. (2015), *Puchenie porod pochvy v vyrabotkah ugolnyh shaht* [Heaving of bottom rocks in coal mines workings], LyzunovPress, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Tereschuk, R.M., Gapeyev, S.N., Khoziaikina, N.V., Kovalenko, V.V. (2016), *Resursozberihayuchi tekhnolohiyi upravlinnya stiykisty protyazhnykh vyrobok vuhil'nykh shakht* [Resource-saving technologies for controlling the stability of extended workings of coal mines], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Tereschuk, R.M., Naumovich, A.V. (2016), *Obespecheniye ustoychivosti podgotovitel'nykh vyrabotok glubokikh ugol'nykh shakht* [Ensuring the sustainability of preparatory workings of deep coal mines], NMU, Dnipropetrovsk, Ukraine.
4. Phase2. *Finite Element Analysis for Excavations and Slopes. version 8.0* // Режим доступа: <https://www.rocscience.com/products/3/Phase2>.
5. Gapeyev, S.N., Oleksyuk, A.B., Logunova, A.O. (2011), *Determination of the rational place for laying the vent line using numerical models*, Scientific Bulletin of National Mining University, no. 6, pp. 60–65.
6. Shashenko, A.N., Kravchenko, K.V., Korol, A.Yu. (2013), *Numerical simulation of stability loss rocks soil in mines deep foundation*, Research and practice journal: Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: Kremenchuk: KrNU. Issue 9 (12), pp. 105–112.
7. Sdvyzhkova, O.O., Popovich, I.N., Dudka, I.V., Kuziaieva, O.A. (2014), *Geomechanical estimating the efficiency of a roadway support and protection under conditions of «PARTIZANSKAJA» coal mine GP «ANTRACIT»*, Transactions of

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: Kremenchuk: KrNU, iss. 4, pp. 129–133.

8. Solodyankin, O.V., Yankin, O.E. (2014), *Substantiation of a new scheme of rock blasting during shafts sinking*, Mining of Mineral Deposits, vol. 8, Is. 2, pp. 229–237.

9. Babets, D.V., Sdvyzhkova, O.O., Larionov, M.H. and Tereshchuk, R.M. (2017), “Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems”, Scientific Bulletin of National Mining University, no. 2. pp. 58–64.

10. Mkrtchyan, S.V., Kovalenko, V.V., Vyhodyn, M.A., Garkusha, V.S. (2016), *Prospects for the use of mining rock in hardening mixtures to stabilize the capital workings*, Coal of Ukraine, no. 1, pp. 28–32.

11. Khalymendyk, O.V., Vyhodyn, M.A., Solodyankin, O.V. (2018), *Technology of creating a backfill between the support and rock contour in the construction of mine workings*, Collection of research papers of National Mining University, no. 54, pp. 261–270.

12. Vygodin, M.A. and Yevtushenko, V.V. (1999), *Improvement of the capital workings supports*, Scientific Bulletin of National Mining University, no. 4, pp. 27–30.

13. Vinogradov, V.V., Krukovsky, A.P., Krukovskaya, V.V. (2007), *Application of the anchor support structures as a technological method for reducing the methaneability of mine workings*, Science and Society, Problems of the computational mechanics and design, Zb. sciences. prac., Dnepropetrovsk, iss. 11. pp. 30–37.

14. Solodyankin, O., Hryhoriev, O., Dudka, I., Mashurka, S. (2017), *Criterion to select rational parameters of supports to reduce expenditures connected with construction and maintenance of development working*, Scientific Bulletin of National Mining University, no. 2., pp. 19–27.

15. Garkusha, V.S., Voronin, S.A., Mkrtchyan, S.V. (2016), *Perspektivy ispol'zovaniya izvlekayemoy porody pri obespechenii ustoychivosti kapital'nykh vyrabotok shakht kompanii «DTEK Pavlogradugol'»* [Prospects for the use of recoverable rock while ensuring the sustainability of the mine workings of DTEK Pavlogradugol], Lithographer, Dnepr, Ukraine.

Стаття надійшла 26.11.2018.