А.Н. Шашенко
Н.В. Хозяйкина
А.И. Дубовик
Д.О. Сосна

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОЙ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Пучение пород почвы является одним из наиболее распространенных геомеханических процессов в подземных горных выработках угольных шахт. На ликвидации его последствий занято до 30 % подземного персонала. С ним связаны большие производственные затраты. Теоретическое изучение этого явления затруднено тем, что в настоящее время отсутствует математический аппарат, позволяющий описывать процессы, протекающие со сверхбольшими относительными деформациями. По этой причине, не смотря на то, что существует большое количество теоретических моделей этого явления, решение проблемы пучения пород почвы в горных выработках еще далеко от завершения.

Наиболее точно описывает механизм вспучивания бифуркационная теория, рассматривая его, как процесс потери упругопластической устойчивости породного массива, ослабленного подземной выработкой. Исходя из этой теории и опираясь на возможности численного моделирования методом конечных элементов, в настоящей статье выполнены исследования, связанные с цифровой имитацией процесса вспучивания пород почвы в одиночных выработках.

Рассмотрены горно-геологические условия ПСП «Шахта Степная» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь». Приведены результаты численного моделирования процесса вспучивания пород почвы в капитальных выработках. На первом этапе исследована однородная модель. Приведена методика численного моделирования процесса вспучивания пород почвы в одиночной выработке. В качестве инструмента исследований принят метод конечных элементов, реализованный в программном продукте RS2 канадской компании Rockscience.

Ключевые слова: пучение пород почвы, численное моделирование, цифровая имитация, геомеханический процесс, бифуркационная теория.

Постановка задачи. Пучение пород почвы – это известный геомеханический процесс, изучению которого посвящены сотни статей и монографий. Их обстоятельный обзор содержится в монографии [1]. Однако, в силу специфики этого явления, которое характеризуется, прежде всего, сверхбольшими деформациями контура выработки (почвы), решение этой проблемы все еще далеко от своего завершения. Причина таких обстоятельств кроется в отсутствии математического аппарата, использование которого могло бы способствовать эффективному решению задач подобного рода. Единственный путь, позволяющий выполнить математическое моделирование этой геомеханической ситуации, состоит в использовании численных моделей, которые позволяют найти приближенные решения, в достаточной мере адекватно отражающие процесс вспучивания пород в горных выработках.

Анализ исследований и публикаций. Первые попытки решить эту задачу были предприняты в следующими учеными

Гурдус А.В. [2], Леонов П.В. [3], Цимбаревич П.М. [4], Лыткин В.А. [5], Комиссаров М.А. [6], Западинский Л.А. [7], Черняк И.Л. [8], Шашенко А.Н. [9], Литвинский Г.Г. [10], Меликсетов С.С. [11], Сонин С.Д. [12], Заславский Ю.З. [13, 14]. Все вышеперечисленные исследования методик прогноза пучения направлены, с одной стороны, на определение вероятности появления пучения в определенных горно-геологических или горнотехнических условиях эксплуатации выработки, и, с другой, на установление аналитических или эмпирических зависимостей для определения ожидаемой величины поднятия почвы в выработке. Очевидно, что степень точности получаемых при этом прогнозных оценок зависит от адекватности принятых в основу расчета моделей, гипотез и подходов [1].

Основная гипотеза. Наиболее глубоко теоретическая часть проблемы была исследована в работах А.Н. Шашенко [8, 15, 16, 17, 18], А.В. Солодянкина [19, 20, 21], А.Ю. Король [22]. Суть их состоит в том, что явление вспучивания пород почвы в

горных выработках рассматривается, как процесс потери упругопластической устойчивости породного массива, ослабленного горной выработки. На основе упрощенного подхода Ишлинского-Лейбензона [23, 24] решена первая задача в этом направлении [1], которая позволила получить условие, при котором произойдет вспучивание пород почвы в одиночной выработке в конкретных горно-геологических условиях при коэффициенте бокового распора $\lambda = 1$:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^* \ln^2 r_L^* \leq 2, \quad (1)$$

где r_L^* - критический размер зоны неупругих деформаций, $\bar{\varepsilon}_v$ - средняя величина коэффициента пластического разрыхления пород.

В работах А.В. Солодянкина эти исследования были продолжены для случая, когда коэффициент бокового распора $\lambda \neq 1$ и, кроме того, в качестве переменной был принят не радиус зоны неупругих деформаций, а величина перемещений контура выработки – U_0 . Критериальное выражение имеет вид:

$$u_y^* = \frac{\varepsilon_v \left[\exp \left(- \frac{(1+\lambda)}{2N_\theta B} \right) \left(1 - \frac{(\lambda-1)}{N_\theta B} \right) - 1 \right]}{\left(\frac{3,48}{r_L} \right)^{3,33}}. \quad (2)$$

Здесь u_y^* - предельные относительные смещения контура выработки; ε_v - относительный объем расширения пород вокруг выработки; r_L - радиус зоны неупругих деформаций; B - константа, которая определяется выражением

$$B = \frac{r_L^2 - k_{ocm}}{1 - r_L^2}, \quad \text{где} \quad k_{ocm} = \frac{R_{ocm}}{R_c} -$$

коэффициент остаточной прочности, R_{ocm} – остаточная прочность пород на одноосное сжатие на контуре выработки;

$$N_\theta = \theta \sqrt{\psi + \frac{2(1-\psi)}{\theta}}, \quad \text{где} \quad \theta = \frac{R_c k_c}{\gamma H} -$$

показатель условий разработки, где k_c - коэффициент структурного ослабления

$$\text{массива.} \quad \psi = \frac{R_p}{R_c}; \quad R_p, R_c -$$

соответственно пределы прочности образцов горных пород на одноосное растяжение и сжатие.

В работах Король А.Ю. [22, 25-27] была предпринята попытка выполнить имитацию процесса пучения пород, в горных выработках на численных (цифровых) моделях для однородного породного массива. Эти исследования позволили убедиться в том, что направление поиска выбрано правильно, и этот путь позволит в известной степени приблизиться к решению этой сложной геомеханической проблемы.

Постановка задач и методика исследований. В настоящей работе продолжены эти исследования для случая неоднородного (слоистого) породного массива. Задача исследований, состоит в разработке методики моделирования на цифровых моделях явления вспучивания пород почвы в одиночных выработках. Последовательность выполнения действий следующая:

- на первом этапе для однородной модели применительно к выработке круглой формы в заданных горно-геологических условиях определяется критический радиус зоны неупругих деформаций и смещение контура с использованием точный аналитических методов (тестовая задача [1]);

- на втором этапе строится численная однородная модель для тех же горно-геологических условий, при которой размер зоны неупругих деформаций и смещение контура выработки примерно равны, полученным на основе замкнутых аналитических уравнений. Параметры модели являются базовыми;

- на третьем этапе осуществляется искусственное поднятие почвы выработки, начиная от предельного (базового) значения;

- устанавливается закономерность изменения смещений контура величин в кровле и в почве выработки (зоны неупругих деформаций);

- делаются выводы в отношении адекватности полученной численной модели реальным геомеханическим процессам.

Метод исследований, расчетные схемы и результаты моделирования. Горно-геологические условия заложения

выработки соответствуют ПСП «Шахта Самарская ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь». В качестве инструмента исследований принят метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе RS2 канадской компании Rockscience. На основе

исследований, выполненные в работе [1], построены зависимости, приведенные на рис. 1. Они соответствуют выбранным горно-геологическим условиям.

Рис. 1. Зависимости критических значений радиуса зоны неупругих деформаций и смещений контура выработки для горно-геологических условий ПСП «Шахта Степная» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь»

Из них следует, что для горно-геологических условий ПСП «Шахта Степная» коэффициент условий разработки равен 0,08, относительный критический радиус зоны неупругих деформаций составляет 2,5 м и смещение контура – 0,25 м. Эти параметры являются базовыми для разработки численных моделей.

На рис. 2,а показана конечно-элементная расчетная схема для круглой выработки и на рис. 2,б для выработки

арочной формы. Породная среда в первом приближении принята однородной. На рис 3 и 4 приведены конфигурация и размеры зоны неупругих деформаций и смещения контура соответственно для выработки круглой и арочной формы. Они приблизительно равны. Отличие состоит в несколько больших перемещениях почвы выработки с арочной формой вследствие специфики ее очертания.

Рис. 2. Конечно-элементная схема для выработки круглого (а) и арочного (б) поперечного сечения

Рис. 3. Радиус зоны неупругих деформаций (а) и смещение контура для круглой выработки (б)

Рис. 4. Размер зоны неупругих деформаций (а) и смещение контура для арочной выработки (б)

На рис. 5, 6 и 7 в качестве примера показано, как меняется очертание зоны неупругих деформаций в окрестности выработки при заданных смещениях ее контура со стороны почвы.

Величина смещений в численном эксперименте менялась от 0,25 до 1,5 м с интервалом 0,25 м. Всего было проанализировано 6 численных моделей.

Результаты исследований. Обобщая результаты численных экспериментов, следует отметить, что искусственное приложение перемещений к контуру выработки вызывает резкое изменение

глубины зоны неупругих деформаций в почве (примерно, в 3-4 раза) и практически совершенно не сказывается на размерах разрушенных пород в кровле ($r_{L_{кр}} = const$).

Это обстоятельство отражено на рис. 8. Из него следует также, что динамика роста глубины зоны неупругих деформаций в почве носит нелинейный характер и подчиняется следующей зависимости:

$$r_{L_n} = -0,9242\Delta y^2 + 2,6886\Delta y + 5,2114, \quad (3)$$

при $R^2 = 0,9707$.

Рис. 5. Размер зоны неупругих деформаций (а) и смещений контура выработки (б) при величине искусственного поднятия 0,25 м

Рис. 6. Размер зоны неупругих деформаций и смещения контура выработки при величине искусственного поднятия почвы на 0,5 м

Рис. 7. Размер зоны неупругих деформаций и смещения контура выработки при величине искусственного поднятия почвы на 1,5 м

Рис. 8. Динамика изменений радиуса зоны неупругих деформаций в почве (а) и в кровле (б) выработки

Именно такой характер деформирования приконтурного массива вокруг одиночных выработок подтверждается натурными изменениями [1]. Это говорит об адекватности исследуемых численных моделей реально протекающему геомеханическому процессу.

Выводы.

1. Разработана методика численного моделирования процесса пучения пород почвы магистральных выработок.
2. Установлен нелинейный характер протекания процессов разрушения пород почвы.
3. Доказана, в первом приближении, адекватность исследуемых геомеханических моделей реально протекающему процессу вспучивания пород почвы в подземных выработках.

Список литературы

1. Шашенко А.Н. Пучение пород подошвы выработок угольных шахт / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Смирнов. – Днепропетровск: «ЛизуновПрес», 2015. – 256 с.

2. Гурдус А.В. Изучение причин вспучивания горных пород каменноугольной формации Донбасса и меры борьбы с этим явлением / А.В. Гурдус. – Харьков: Гос. научно-техн. изд-во, 1933. – 85 с.
3. Городничев В.М. Пучение горных пород и меры борьбы с этим явлением / В.М. Городничев. – М.: Центр. ин-т техн. информации, 1954. – 130 с.
4. Цимбаревич П.М. Механика горных пород / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1959. – 608 с.
5. Лыткин В.А. Пучение пород в горных выработках / В.А. Лыткин. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1963. – 26 с.
6. Комиссаров М.А. Исследование сдвижения пород в пластовых штреках / М.А. Комиссаров, В.В. Шевченко, В.М. Андриенко // Труды ДонУГИ. – М.: Недра, 1968. – № 41. – С. 49-79.
7. Западинский Л.А. Проявление пучения горных пород в выработках и методы борьбы с ним / Л.А. Западинский // Уголь. – 1975. – №5. – С. 36-37.
8. Черняк И.Л. Предотвращение пучения почвы в горных выработках / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1978. – 237 с.
9. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.04 / Шашенко Александр Николаевич. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.
10. Литвинский Г.Г. Метод прогноза пучения почвы в горных выработках / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Уголь Украины. – 2004. – № 1. – С. 9-11.

11. Меликсетов С.С. Способы защиты и крепление горных выработок на пластах с дующей почвой / С.С. Меликсетов // Новости техники. – 1940. - № 15.

12. Борьба с пучением пород в горных выработках / С.Д. Сонин, М.Н. Шейхет, И.Л. Черняк и др. – М.: Недра, 1966. – 200 с.

13. Заславский Ю.З. Расчет параметров крепи выработок глубоких шахт / Ю.З. Заславский, А.Н. Зорин, И.Л. Черняк. – К.: Техника, 1972. – 156 с.

14. Заславский Ю.З. Прогнозирование пучения пород почвы в одиночных горизонтальных выработках / Ю.З. Заславский // Шахтное строительство. – 1964. – № 11. – С. 11-12.

15. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Універ. вид-во "Пульсари", 2002. – 304 с.

16. Шашенко А.Н. Критерий устойчивости в задаче о пучении пород почвы подземной выработки / А.Н. Шашенко, А.Н. Роевко, М.Е. Каганов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1994. - №1.

17. Шашенко А.М. Математическая модель процесса потери упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки / А.М. Шашенко, С.Н. Гапеев // Матеріали Українсько-Польського форуму гірників – 2004 «Гірничовидобувна промисловість України і Польщі: Актуальні проблеми і перспективи». – Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – С. 75-80.

18. Шашенко А.Н. Подход к моделированию возмущенного процесса при исследовании потери упругопластической устойчивости почвы одиночной выработки / А.М. Шашенко, С.Н. Гапеев // Материалы междунар. научно-практич. симпозиума «Современные проблемы шахтного и подземного строительства». – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – С. 56-63.

19. Солодянкин А.В. Обоснование параметров способа усиления крепи подготовительных выработок при несимметричной нагрузке: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Солодянкин Александр Викторович. – Днепропетровск, 1996. – 243 с.

20. Солодянкин А.В., Выгодин М.А., Смирнов А.В., Коробченко В.В., Прокудин А.З. Тампонаж закрепного пространства как эффективное средство создания системы «крепь-массив» // Форум гірників-2014: Матеріали міжнародної конференції 1-4 жовтня 2014 р. – Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2014. – С. 112-120.

21. Солодянкин А.В., Выгодин М.А., Коробченко В.В., Смирнов А.В., Прокудин А.З. Совершенствование технологии тампонажа закрепного пространства в сложных горно-геологических условиях шахт Западного Донбасса // Розробка родовищ. Д.: ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – С. 171-178.

22. Король А.Ю. Закономерности деформирования приконтурного массива в окрестности одиночной выработки при вспучивании пород почвы / А.Ю. Король // Міжвідомчий збірник наукових праць «Геотехнічна механіка», 2014. - № 115: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – С. 170-175.

23. Ишлинский А.К. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости / А.К. Ишлинский //

Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 2. – С. 140-146.

24. Лейбензон Л.С. О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек / Л.С. Лейбензон. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 1. – С. 50-85.

25. Шашенко А.Н. Численное моделирование процесса пучения пород почвы в горных породах / А.Н. Шашенко, К.В. Кравченко, И.Н. Попович, А.Ю. Король // Матеріали міжнар. конф. «Форум гірників - 2013», 2-5 жовт. 2013 р. Геомеханіка і геотехніка. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – Т. 2. – С. 170-17.

26. Король А.Ю. Закономірності процесу здимання порід підосви в присічних підготовчих виробках глибоких вугільних шахт: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / А.Ю. Король – Дніпропетровськ, 2014. – 21 с.

27. Хозяйкина Н.В. Влияние количества анкерв на величину пучения пород почвы //Н.В. Хозяйкина, М.С. Дубицкая, А.Ю. Король // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Випуск 3 (86). – С. 143 – 148.

References

1. Shashenko A.N., Solodyankin A.V., Smirnov A.V. (2015), "Floor heaving of coal mine excavations", ["Puchenie porod podoshvy vyrabotok ugol'nyh shaht"], 256 p., (in Russian)]

2. Gurdus A.V. (1933), "Study of the causes of swelling of rocks in the Carboniferous formation of Donbass region and measures to combat this phenomenon", ["Izuchenie prichin vspuchivaniya gornyh porod kamennougol'noj formacii Donbassa i mery bor'by s jetim javleniem"], 85 p., (in Russian)]

3. Gorodnichev V.M. (1954), "Floor heaving and measures to combat this phenomenon", ["Puchenie gornyh porod i mery bor'by s jetim javleniem"], 130 p., (in Russian)]

4. Cimbarevich P.M. (1959), "Mechanics of rocks", ["Mehanika gornyh porod"], 608 p., (in Russian)]

5. Lytkin V.A. (1963), "Floor heaving in excavations", ["Puchenie porod v gornyh vyrabotkah"], 26 p., (in Russian)]

6. Komissarov M.A., Shevchenko V.V., Andrienko V.M. (1968), "Investigation of rock displacement in formation mines", ["Issledovanie sdvizeniya porod v plastovyh shtrekah"], pp. 49-79, (in Russian)]

7. Zapadinsky L.A. (1975), "Manifestation of floor heaving in excavations and methods of dealing with it", ["Projavlenie puchenija gornyh porod v vyrabotkah i metody bor'by s nimi"], pp. 36-37, (in Russian)]

8. Chernyak I.L. (1978), "Prevention of floor heaving in excavations", ["Predotvrashhenie puchenija pochvy v gornyh vyrabotkah"], 237 p., (in Russian)]

9. Shashenko A.N. (1988), "Stability of excavations in an inhomogeneous rock mass", ["Ustojchivost' podzemnyh vyrabotok v neodnorodnom porodnom massive: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.15.04"], 507 p., (in Russian)]

10. Litvinsky G.G. (2004), "The method of forecasting of floor heaving in excavations", ["Metod prognoza puchenija pochvy v gornyh vyrabotkah"], Coal of Ukraine (2004), № 1, pp. 9-11, (in Russian)]

11. Meliksetov S.S. (1940), "Methods of protection and fixing of excavations on strata with floor heaving",

["Sposoby zashchity i kreplenie gornyh vyrabotok na plastah s dujushhej pochvoj"], Technical news, № 15 (in Russian)]

12. Sonin S.D., Shaikhet M.N., Chernyak I.L. (1966), "Fighting floor heaving in excavations", ["Bor'ba s pucheniem porod v gornyh vyrabotkah"], 200 p. (in Russian)]

13. Zaslavsky Y.Z., Zorin A.N., Chernyak I.L. (1972), "Calculation of the parameters of the support of deep excavations", ["Raschet parametrov krepki vyrabotok glubokih shaht"], 156 p. (in Russian)]

14. Zaslavsky Y.Z. (1964), "Forecasting of floor heaving in single horizontal excavations", [Prognozirovanie pucheniya porod pochvy v odinochnyh gorizontallyh vyrabotkah], Mining building № 11, pp. 11-12 (in Russian)]

15. Shashenko A.N., Tulub S.B., Sdvizhkova E.A. (2002), "Some problems of statistical geomechanics", ["Nekotorye zadachi statisticheskoy geomehaniki"], 304 p. (in Russian)]

16. Shashenko A.N., Roenko A.N., Kaganov M.E. (1994), "Criterion of stability in the problem of floor heaving in excavation", ["Kriterij ustojchivosti v zadache o puchenii porod pochvy podzemnoj vyrabotki"], Mining journal num. 1 (in Russian)]

17. Shashenko A.N., Gapeev S.N. (2004), "Mathematical model of the process of loss of elastoplastic stability of a rock mass in the vicinity of single excavation", ["Matematicheskaja model' processa poteri uprugoplasticheskoy ustojchivosti porodnogo massiva v okrestnosti odinochnoj vyrabotki"] Materiali Ukraïns'ko-Pol's'kogo forumu girnikiv – 2004 «Girnichovidobuvna promislivost' Ukraïni i Pol'shhi: Aktual'ni problemi i perspektivi», pp. 75-80 (in Russian)]

18. Shashenko A.N., Gapeev S.N. (2004), "Approach to the modeling of the perturbed process in the study of the loss of elastoplastic floor stability of a single excavation", ["Podhod k modelirovaniju vozmushhennogo processa pri issledovanii poteri uprugoplasticheskij ustojchivosti pochvy odinochnoj vyrabotki"], Materialy mezhdunar. nauchno-praktich. simpoziuma «Sovremennye problemy shahtnogo i podzemnogo stroitel'stva», pp. 56-63 (in Russian)]

19. Solodyankin A.V. (1996), "Justification of the parameters of the method for strengthening the support of the excavations with an asymmetric loading", ["Obosnovanie parametrov sposoba usilenija krepki podgotovitel'nyh vyrabotok pri nesimmetrichnoj nagruzke"], 243 p. (in Russian)]

20. Solodyankin A.V., Vygodin M.A., Smirnov A.V., Korobchenko V.V., Prokudin A.Z. (2014), "Plugging fixing space as an effective means of creating "lining-array" system", ["Tamponazh zakrepnogo prostranstva kak jeffektivnoe sredstvo sozdaniya sistemy «krep'-

massiv»"], Forum girnikiv-2014: Materiali mizhnarodnoi konferencii 1-4 zhovtnja 2014 r., pp. 112-120 (in Russian)]

21. Solodyankin A.V., Vygodin M.A., Smirnov A.V., Korobchenko V.V., Prokudin A.Z. (2014), "Improving plugging fixing space technology in difficult rock - geological conditions of Western Donbas mines", ["Sovershenstvovanie tehnologii tamponazha zakrepnogo prostranstva v slozhnyh gorno - geologicheskikh uslovijah shaht Zapadnogo Donbassa"], pp.171-178 (in Ukrainian)]

22. Korol A.Y. (2014), "Patterns of deformation of the near-boundary rock mass in the vicinity of a single mine during the expansion of floor heaving", ["Zakonomernosti deformirovanija prikonturnogo massiva v okrestnosti odinochnoj vyrabotki pri vspuchivanii porod pochvy"], Mizhvidomchij zbirnik naukovih prac' «Geotekhnichna mehanika», 2014. - № 115, pp. 170-175 (in Ukrainian)]

23. Ishlinsky A.K. (1954), "Consideration of questions about the stability of the equilibrium of elastic bodies from the point of view of the mathematical theory of elasticity", ["Rassmotrenie voprosov ob ustojchivosti ravnovesija uprugih tel s točki zrenija matematicheskoy teorii uprugosti"], Ukrainiskij matematicheskij zhurnal. – 1954. – T. 6, № 2, pp. 140-146 (in Russian)]

24. Leibenzon L.S. (1951), "About application of harmonic functions to the question of the stability of spherical and cylindrical shells", ["O primenenii garmonicheskikh funkcij k voprosu ob ustojchivosti sfericheskoy i cilindricheskoy obolochek"], pp. 50-85 (in Russian)]

25. Shashenko A.N., Kravchenko K.V., Popovich I.N., Korol A.Y. (2013), "Numerical modeling of the process of floor heaving in rock mass", ["Chislennoe modelirovanie processa pucheniya porod pochvy v gornyh porodah"], Materiali mizhnar. konf. «Forum girnikiv - 2013», 2-5 zhovt. 2013 r. Geomehanika i geotekhnika, pp. 170-178 (in Russian)]

26. Korol A.Y. (2014), "Regularities of floor heaving in the pristine preparatory excavations of deep coal mines", ["Zakonomirnosti procesu zdimannja porid pidoshvi v prisichnih pidgotovchih virobkah glubokih vugil'nih shaht"], avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.15.09, 21 p. (in Ukrainian)]

27. Hozyaykina N.V., Dubitskaya M.S., korol A.Y. (2014), "Influence of the number of anchors on the value of the floor heaving", ["Vlijanie kolichestva ankerov na velichinu pucheniya porod pochvy"], Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo - Vipusk 3 (86), pp. 143-148 (in Ukrainian)]

Надійшла до редакції 01.11.2017

Рецензент д-р. економ. наук, доц. Ляшок Я.О.

Шашенко Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства геотехники и геомеханики Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» Министерства образования и науки Украины, 49005 Украина, Днепр, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Хозяйкина Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства геотехники и геомеханики Государственного высшего учебного заведения

«Национальный горный университет» Министерства образования и науки Украины, 49005 Украина, Днепро, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: nv.khozyaykina@gmail.com

Дубовик Александр Иванович – горный инженер, ГП «УК «Краснолиманская», шахта «Краснолиманская», 85310 Украина, Донецкая обл., Родинское, ул. Победы, 9.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Сосна Дмитрий Олегович – студент, студент кафедры строительства геотехники и геомеханики Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» Министерства образования и науки Украины, 49005 Украина, Днепро, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: iamdims77@gmail.com

МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОЇ ІМІТАЦІЇ ПРОЦЕСУ СПУЧЕННЯ ПОРІД ПІДОШВИ В МАГІСТРАЛЬНИХ ВИРОБКАХ

Анотація. Спучування порід підшви є одним з найбільш розповсюджених геомеханічних процесів підземних гірничих виробках вугільних шахт. На ліквідації його наслідків зайнято до 30 % підземного персоналу. З ним пов'язані великі виробничі витрати. Теоретичне вивчення цього явища ускладнено тим, що в наш час відсутній математичний апарат, який дозволяє описати процеси, що протікають із надвеликими відносними деформаціями. З цієї причини, не дивлячись на те, що існує велика кількість теоретичних моделей цього явища, рішення проблеми спучування порід підшви в гірничих виробках ще далеко від завершення.

Найбільш точно описує механізм спучення буфуркаційна теорія, розглядаючи його як процес втрати пружнопластичної стійкості породного масиву, послабленого підземною виробкою. Виходячи з цієї теорії і спираючись на можливості чисельного моделювання методом кінцевих елементів, в цій статті виконані дослідження, пов'язані з цифровою імітацією процесу спучування порід підшви в одиночних виробках.

Розглянуто гірничо-геологічні умови ПСП «Шахта Степна» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Приведені результати чисельного моделювання процесу спучення порід підшви в капітальних виробках. На першому етапі досліджена однорідна модель. Приведена методика чисельного моделювання процесу спучування порід підшви в одиночній виробці. В якості інструменту досліджень прийнятий метод кінцевих елементів, реалізований в програмному продукті RS2 канадської компанії Rockscience.

Ключові слова: спучування порід підшви, чисельне моделювання, цифрова імітація, геомеханічний процес, буфуркаційна теорія.

Шашенко Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України, 49005 Україна, Дніпро, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Хозяйкіна Наталія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України, 49005 Україна, Дніпро, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: nv.khozyaykina@gmail.com

Дубовик Олександр Иванович – гірничий інженер, ДП «ВК «Краснолиманська», шахта «Краснолиманська», 85310 Україна, Донецька обл., Родинське, вул. Перемоги, 9.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Сосна Дмитро Олегович – студент, студент кафедри будівництва геотехніки і геомеханіки Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України, 49005 Україна, Дніпро, пр. Д. Яворницкого, 19.

E-mail: iamdims77@gmail.com

Abstract. Floor heaving is one of the most common geomechanical processes in excavations of coal mines. Up to 30% of underground personnel are employed to eliminate its consequences. It's associated with high production costs. Theoretical study of this phenomenon is complicated by the fact that currently there is no mathematical tool, allowing to describe the processes which are flowing with very large relative strains. For this reason, despite the fact that there are a large number of theoretical models of this phenomenon, the floor heaving solution is still far from complete.

The bifurcation theory most precisely describes the mechanism of floor heaving, treating it as a process of loss of stability of the elastoplastic stability of the rock mass, which is weakened by excavation. Studies, related to the digital simulation of the process of floor heaving in solitary excavations have been carried out proceeding from this theory and relying on the possibilities of numerical simulation by the finite element method.

Mining and geological conditions of the PSP "Stepnaya mine" PJSC "DTEK Pavlogradugol" were considered. The results of numerical modeling of the process of floor heaving in the capital excavations are given. At the first stage the homogeneous model is studied. Method of numerical modeling of the process of floor heaving in a single excavation is given. The finite element method has been adopted as a research tool, which implemented in the software product "RS2" of the Canadian company "Rockscience".

Key words: floor heaving, numerical modelling, digital simulation, geomechanical process, bifurcation theory.

Shashenko O. - Ph.D., Professor, Department of Construction and Geomechanics Geotechnics State Higher Educational Institution "National Mining University" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 49005 Ukraine, Dnipro, etc. D. Yavornytsky, 19.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Khoziaikina N. – Ph.D., Associate Professor, Department of Construction and Geomechanics geotechnics State Higher Educational Institution "National Mining University" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 49005 Ukraine, Dnipro, etc. D. Yavornytsky, 19.

E-mail: nv.khozyaykina@gmail.com

Dubovyk O. - mining engineer, State enterprise «UK Krasnolimanskaya», mine "Krasnolimanskaya", 85310 Ukraine, Donetsk region, Rodinskoe, street Pobedy, 9.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Sosna D. – student, Department of Construction and Geomechanics Geotechnics State Higher Educational Institution "National Mining University" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, 49005 Ukraine, Dnipro, etc. D. Yavornytsky, 19.

E-mail: iamdims77@gmail.com