

technologii girnichogo virbnictva. – Kremenchuk: KrNU, 2012. – Vip. 2(10). – pp. 68–72.

5. Dobrovolskiy, A., Koshelenko, P. (1989), *Abrazivnaya iznosostoikost materialov: spravochnoe posobie* [Abrasive wear materials], Technika, Kyiv, Ukraine.

6. Drozd, M., Matlin, M., and Sidyakin, U. (1986) *Ingenierne raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformacii* [Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 23.10.2013.

УДК 622.281

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

А. Н. Шашенко, К. В. Кравченко, А. Ю. Король

Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»

просп. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, kravchenko_k_v@i.ua

Предложен новый подход к численному моделированию процесса потери устойчивости пород почвы в выработках глубоких угольных шахт. В его основу положена теория бифуркации эмпирического состояния приконтурного породного массива в окрестности одиночной выработки глубокого заложения. Установлены закономерности протекания геомеханических процессов в окрестности одиночной выработки. В численные модели заложены горно-геологические условия ПСП «Шахта «Алмазная» и шахта «Добропольская» ШУ «Добропольское» ОАО ДТЭК.

Ключевые слова: численная модель, устойчивость пород почвы, бифуркация, закономерности деформирования контура.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПОРІД ГРУНТУ У ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДЕННЯ

О. М. Шашенко, К. В. Кравченко, А. Ю. Король

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. Карла Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, kravchenko_k_v@i.ua

Запропоновано новий підхід до чисельного моделювання про-процесу втрати стійкості порід ґрунту у виробках глибоких вугільних шахт. У його основу покладена теорія біфуркації емпіричного стану приконтурного породного масиву навколо одиночної виробки глибокого закладення. Встановлено закономірності протікання геомеханічних процесів навколо одиночної виробки. У чисельні моделі закладені гірничо-геологічні умови ПСП «Шахта» Алмазна» і шахта «Добропольська» ШУ «Добропольское» ВАТ ДТЕК.

Ключові слова: чисельна модель, стійкість порід ґрунту, біфуркація, закономірності деформування контуру.

АКТУАЛЬНОСТЬ РОБОТЫ. С увеличением глубины разработки угольных месторождений усиливаются проявления горного давления. Среди их многообразия наиболее проблемными являются внезапные выбросы угля, породы, газа, или газодинамические явления, и пучение пород почвы в горных выработках. Газодинамические явления часто сопровождаются не только материальными затратами, но и человеческими потерями. Пучение пород почвы в выработках не связано с гибелью людей, но средства, направляемые на ликвидацию его последствий, ежегодно составляют сотни миллионов гривен. В этой связи изучение физической сути этого проявления горного давления, последующего его математического моделирования, является сложной научно-технической проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Цель работы – построение численной модели потери устойчивости пород подошвы одиночной выработки глубокого заложения для последующего прогноза параметров процесса деформирования контура.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Изучение явления вспучивания пород почвы в горных выработках ведется уже более ста лет. Глубокое обобщение научных работ в этом направлении выполнено в монографии [1]. Анализ этих исследований показал, что все гипотезы, объясняющие причину пучения горных пород в подземных выработках, можно свести к следующему перечню:

- набухание пород под действием влаги;
- увеличение объема пород в зоне неупругих деформаций вследствие их пластического разрушения;
- выпирание пород под влиянием опорного давления в боках выработки;
- вязкое течение пород в результате неравновесного состояния массива в почве выработки;
- сорбционное набухание газонасыщенных пористых сред;
- потеря упругопластической устойчивости пород в приконтурной области.

В зависимости от используемых физических моделей все методы оценки явления выдавливания пород в горных выработках можно разделить на четыре группы [2]:

- 1) основанные на применении уравнений статики сыпучей среды (П.М. Цымбаревич, В.Д. Слесарев и др.);
- 2) основанные на использовании реологических уравнений (В.А. Лыткин, А.П. Максимов и др.);
- 3) основанные на эмпирических зависимостях (Ю.З. Заславский, И.Л. Черняк и др.);
- 4) основанные на уравнениях теории упругопластической устойчивости (А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин).

Наиболее обоснованной физически и математически является бифуркационная теория пучения горных пород, рассматривающая это явление, как потерю упругопластической устойчивости приконтурного породного массива, ослабленного выработкой [1–4]. С использованием ее положений выполнено изложенное ниже математическое моделирование этого процесса.

В качестве инструмента исследований использовался программный продукт Phase-2 компании Rocksiense. В соответствии с бифуркационной теорией вспучивания пород почвы в горных выработках по мере увеличения глубины массив в зоне неупругих деформаций разрыхляется. После достижения пластической областью некоторого критического внешнего радиуса выработка довольно быстро теряет форму. Приконтурных массив переходит в новое напряженно-деформированное состояние с более низким уровнем потенциальной энергии, которое в зависимости от горногеологических условий может быть или равновесным, когда процесс пучения со временем прекращается, или квазиравновесным, которое сопровождается непрерывным течением разрыхленных пород со стороны почвы. При этом, следуя логике рассуждений, геомеханические процессы в кровле выработки стабилизируются, а со стороны почвы они чаще всего активизируются.

Условие, при котором произойдет бифуркация геомеханического состояния, получено в [1]. Его математическое выражение в случае гидростатического поля начальных напряжений имеет следующий вид:

$$\overline{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln r_L^* - 2 = 0, \tag{1}$$

где $\overline{\varepsilon}_v$ – средняя величина коэффициента объемного разрыхления пород в приконтурной области [5]; r_L^* – критический относительный радиус зоны неупругих деформаций (ЗНД). Выработка будет устойчивой, если соблюдается условие:

$$r_L < r_L^* . \tag{2}$$

Здесь $r_L = \frac{R_L}{R_0}$ – текущий относительный радиус ЗНД; R_0 – радиус (полутолщина) выработки, м; R_L – радиус ЗНД, м.

Зависимость $r_L^* = r_L^*(\overline{\varepsilon}_v)$ показана на рис. 1.

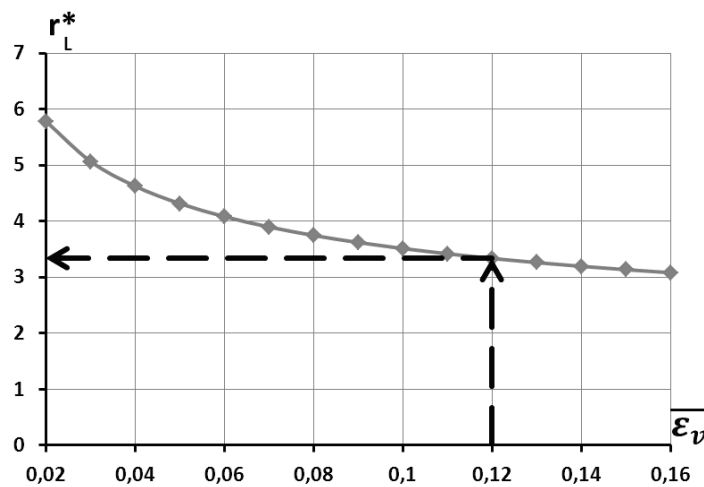


Рисунок 1 – Зависимость критического радиуса ЗНД от величины коэффициента разрыхления пород

Радиус ЗНД для конкретных горногеологических условий определяется на основе трансцендентного уравнения:

$$\frac{r_L^2 \ln r_L}{r_L^2 - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H}{2 R_c k_c}}, \quad (3)$$

где H – глубина расположения выработки, м; γ – объемная масса горных пород, т/м³; R_c – предел прочности горных пород на одноосное сжатие, МПа; k_c – коэффициент структурного ослабления, определяемый из выражений:

$$k_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \cdot \exp(-0,25\eta), \quad (4)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{l_T + l_0}{l_T} (\eta_0^2 + 1)} - 1, \quad (5)$$

где η – коэффициент вариации предела прочности на одноосное сжатие массива; η_0 – коэффициент вариации предела прочности на одноосное сжатие породных образцов; l_T – среднее расстояние между трещинами; l_0 – характерный размер стандартного образца горной породы.

Зависимость $r_L = r_L \left(\frac{R_c k_c}{\gamma H} \right)$ показан на рис. 2.

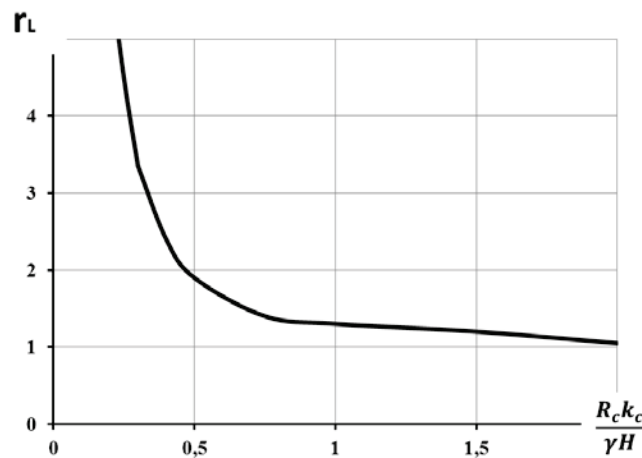


Рисунок 2 – Зависимость радиуса ЗНД от геомеханического показателя $r_L > r_L^*$

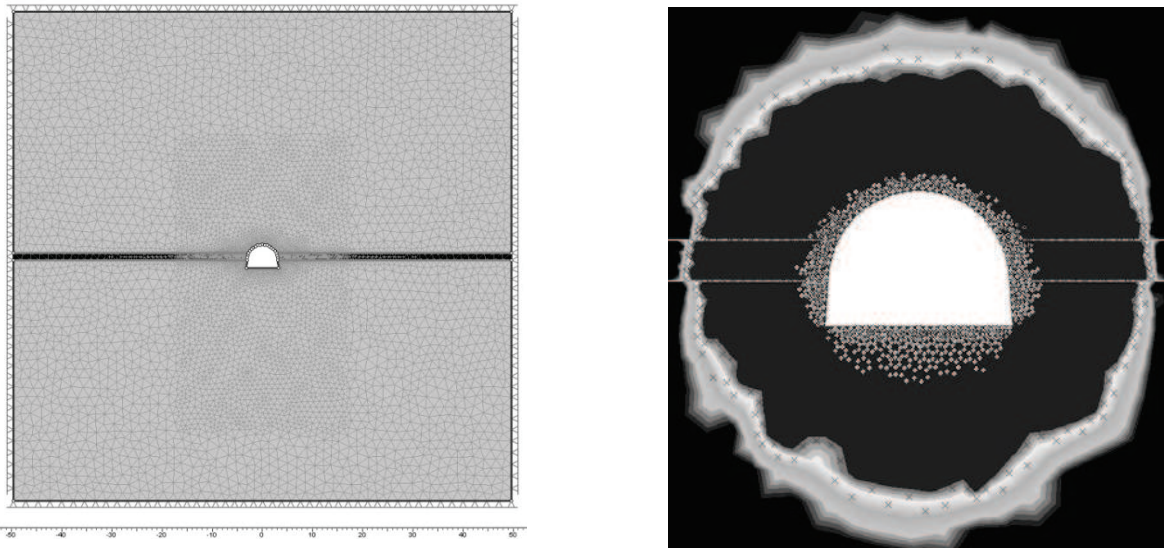
Если в результате расчета окажется, что $r_L > r_L^*$, то следует допустить, что произошла упругопластическая потеря устойчивости рассматриваемой геомеханической системы «породный массив – выработка» и для ее дальнейшего описания применяемый математический аппарат непригоден.

Для анализа явления вспучивания пород почвы поступим следующим образом. Используя зависимости (1) и (3), получим выражение, из которого определим предельную глубину $H_{\text{гб}}$, начиная с которой в выработке произойдет потеря упругопластической устойчивости:

$$\frac{r_L^* \ln r_L^*}{r_L^* - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H_{\text{вб}}}{2 R_c k_c}}. \quad (6)$$

Для предельной глубины $H_{\text{вб}}$ на конечно-элементной модели определим параметры предельного упругопластического состояния: предельный радиус ЗНД $r_L = r_L^*$ и смещения на контуре выработки в кровле и почве $U_{\text{вб}} = U_i$. Для горно-геологических условий ПСП «Шахта «Алмазная» и шахта «Добропольская» ШУ «Добропольское» эти параметры составляют $H_{\text{вб}} = 450$ м, $r_L = r_L^* = 3,3$ м, $U_{\text{вб}} = U_i = 0,29$ м. Расчетная схема и конечно-элементная модель для рассматриваемых условий приведена на рис. 3. Точками показана область пород, разрушенных от растягивающих напряжений.

После этого осуществляем имитацию процесса вспучивания путем искусственного подъема узла конечно-элементной сетки, расположенного в центре почвы, на 0,01 м. Конфигурация ЗНД со стороны почвы при этом существенно изменяется (рис. 4). Область пород, разрушенных от растягивающих напряжений, распространяются вглубь пород почвы на 6,2 м. Размер же ЗНД, перемещения в кровле и боках выработки не меняются по отношению к предыдущей ситуации (рис. 3). Эта же ситуация сохраняется по мере увеличения глубины расположения выработки. Отличие состоит лишь в том, что поднятие почвы увеличивается, а это приводит к росту области разрушенных пород в почве выработки.



а)

б)

Рисунок 3 – Расчетная схема и конечно-элементная модель для рассматриваемых условий

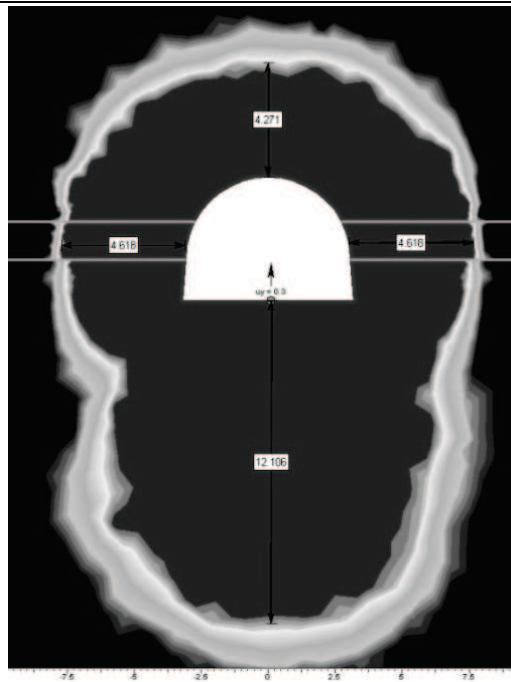


Рисунок 4 – Конфігурація ЗНД при підйомі вузла кінечно-елементної сітки, розположеного в центрі почви, на 0,01 м

Закон, по якому відбувається розвиток геомеханічних процесів в околицях виробки, може носити згасаючий характер або незгасаючий характер, що випливає з графіків натурних вимірювань (рис. 5). При цьому інтенсивність процесів в породах кровлі і почви після точки бифуркації носить різний характер.

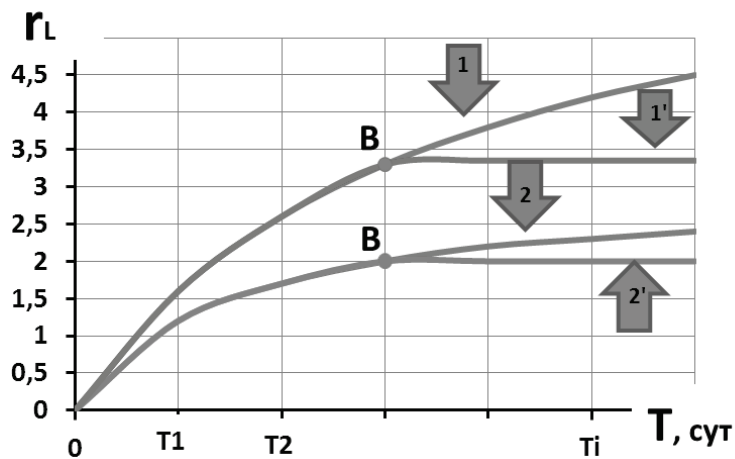


Рисунок 5 – Розвиток геомеханічних процесів в околицях виробки:
 1 – незгасаючий процес в почви; 1' – незгасаючий процес в кровлі;
 2 – згасаючий процес в почви; 2' – згасаючий процес в кровлі;
 В – точка бифуркації

На рис. 6 показана точка бифуркації В і подальше розвиток переміщень в кровлі і почви виробки, претерпеваючої втрату еластичної стійкості. З нього випливає, що після деякого критичного моменту

геомеханические процессы в кровле выработки затухают. На практике это обычно приводит даже к некоторым уменьшению обжатия крепи и снижению нагрузки на нее. В почве же выработки область разрушенных пород увеличивается до $8 - 10R_0$, и этот процесс, как уже отмечалось ранее, может носить либо затухающий, либо незатухающий характер (рис. 5).

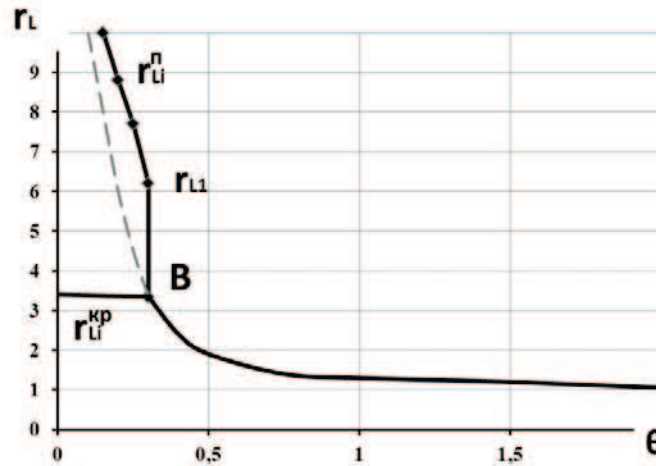


Рисунок 6 – Дальнейшее развитие перемещений в кровле и почве выработке после достижения точки бифуркации В

ВЫВОДЫ.

1. Предложена новая математическая модель явления вспучивания пород почвы в подземных выработках, являющаяся дальнейшим развитием бифуркационной теории.

2. Доказано, что существует некоторая совокупность влияющих факторов, основными из которых являются глубина расположения выработки и прочность вмещающих пород, при достижении которых происходит бифуркация энергетического состояния приконтурного массива, сопровождающаяся вспучиванием пород почвы.

3. После достижения точки бифуркации геомеханические процессы существенно замедляются в породах кровли и начинают активно развиваться в почве, развиваясь до глубины 8–10 полупролетов выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Мартовицкий А.В. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: монография. – Днепропетровск: Лизунов Пресс, 2012. – 384 с.

2. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород. – К.: Новый друк, 2003. – 400 с.

3. Шашенко А.Н. Устойчивость выработок в неоднородном породном массиве: дисс. докт. техн. наук. – Днепропетровск, 1989. – 415 с.

4. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Изд-во «Пульсара», 2001 – 304 с.

5. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Прочность и деформируемость массивов горных пород. – Днепропетровск: Изд-во НГУ, 2008 – 215 с.

**NUMERICAL SIMULATION OF STABILITY LOSS ROCKS SOIL IN MINES
DEEP FOUNDATION**

A. Shashenko, K. Kravchenko, A. Korol

State HEE «National minning university»

prosp. K. Marksa, 19, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, kravchenko_k_v@i.ua

A new approach to the numerical simulation of the process of loss of stability of rocks in the workings of the soil deep coal mines. It is based on the theory of bifurcation of the state of empirical over the rock mass state in the vicinity of mine working deep foundations. Established regularities of geomechanical processes in the vicinity of mine working. In the numerical model laid geological conditions PSP "Mine "Almaznaya" and mine" Dobropilska "SHU" Dobropilskiy "of DTEK.

Key words: numerical model, the stability of rock soil, bifurcation, the laws of deformation of the contour.

REFERENCES

1. Shashenko, A.N. Solodyankin, A.V. and Martovytskyi, A.V. (2012), *Resistance Management extended workings in deep mines*, Monograph, Lizunov Press, Dnepropetrovsk, Ukraine. [in Russian]
2. Shashenko, A.N. and Pustovojtenko, V.P. (2003), *Rock mechanics*, New Druk, Kyiv, Ukraine. [in Russian]
3. Shashenko A.N. "Stability of excavations in a heterogeneous rock mass". (1989), Dissertation. At the applicant's degree of Doctor. Tehn. Science, 05.15.04, Dnepropetrovsk, Ukraine. [in Russian]
4. Shashenko, A.N. Tulub, S.B. and Sdvizhkova, Ye.A. (2001), *Some problems of statistical geomechanics*, Publishing House "Pulsar", Kyiv, Ukraine. [in Russian]
5. Shashenko, A.N. Sdvizhkova, Ye.A. and Gapeev, S.N. (2008), *The strength and deformability of rock massifs dependence*, NMU, Dnepropetrovsk. Ukraine. [in Russian]

Стаття надійшла 23.10.2013

УДК 622.647

**МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ В ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ
ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНЫХ МАШИН**

В. В. Воробьев, И. И. Киба

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.

E-mail: vvv@kdu.edu.ua

Приведена схема деления переменных в одномерном волновом уравнении, позволяющая получить точное решение задачи о поперечных колебаниях конвейерной ленты, ременных передач, шлангов и трубопроводов с протекающей жидкостью, ленточных пил, канатов подъемных устройств.