

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

А.Н. Шашенко, К.В. Кравченко, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Украина

И.Н. Попович, А.Ю. Король, Министерство энергетики и угольной промышленности, Украина

Аннотация. Рассмотрен подход к моделированию явления пучения пород почвы в выработках угольных шахт. Установлены закономерности протекания геомеханических процессов в окрестности одиночной выработки. В численные модели заложены горно-геологические условия ПСП «Шахты «Алмазная» ШУ «Добропольское» ОАО ДТЭК.

Постановка задачи. 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.

Анализ имеющихся 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.

Основная часть. В качестве инструмента исследований использовался программный продукт Phase-2 компании Rocksiense. В соответствии с бифуркационной теорией вспучива-

ния 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:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln r_L^* - 2 = 0, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}_v$ – 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:

$$r_L < r_L^*. \quad (2)$$

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

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

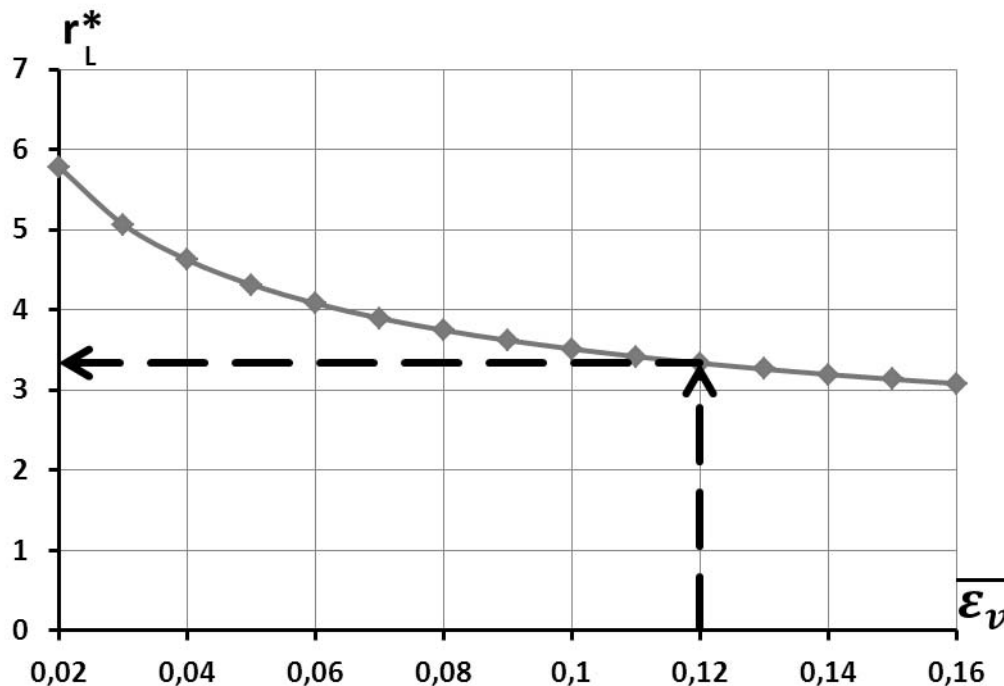


Рис. 1. Зависимость критического радиуса ЗНД от величины коэффициента разрыхления пород

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

$$\frac{r_L^2 \ln r_L}{r_L^2 - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H}{2R_0 k_\sigma}}, \quad (3)$$

где H – глубина расположения выработки, м; γ – объемная масса горных пород, т/м³; R_0 – предел прочности горных пород на одноосное сжатие, МПа; k_σ – коэффициент структурного ослабления, определяемый из выражений:

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

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

Здесь 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.

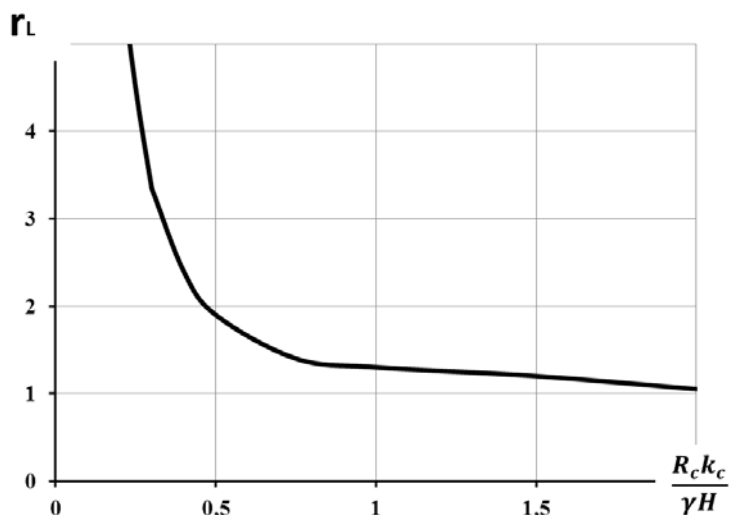


Рис.2. Зависимость радиуса ЗНД от геомеханического показателя $r_L > r_L^*$

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 $H_{пр}$, начиная с которой в выработке произойдет потеря упругопластической устойчивости:

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

Для предельной глубины $H_{пр}$ 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 $U_{кр} = U_{п}$. Для горногеологических условий ПСП «Шахта «Алмазная» ШУ «Добропольское» эти параметры составляют $H_{пр} = 450$ м, $r_L = r_L^* = 3,3$ м, $U_{кр} = U_{п} = 0,29$ 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 (см. 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.

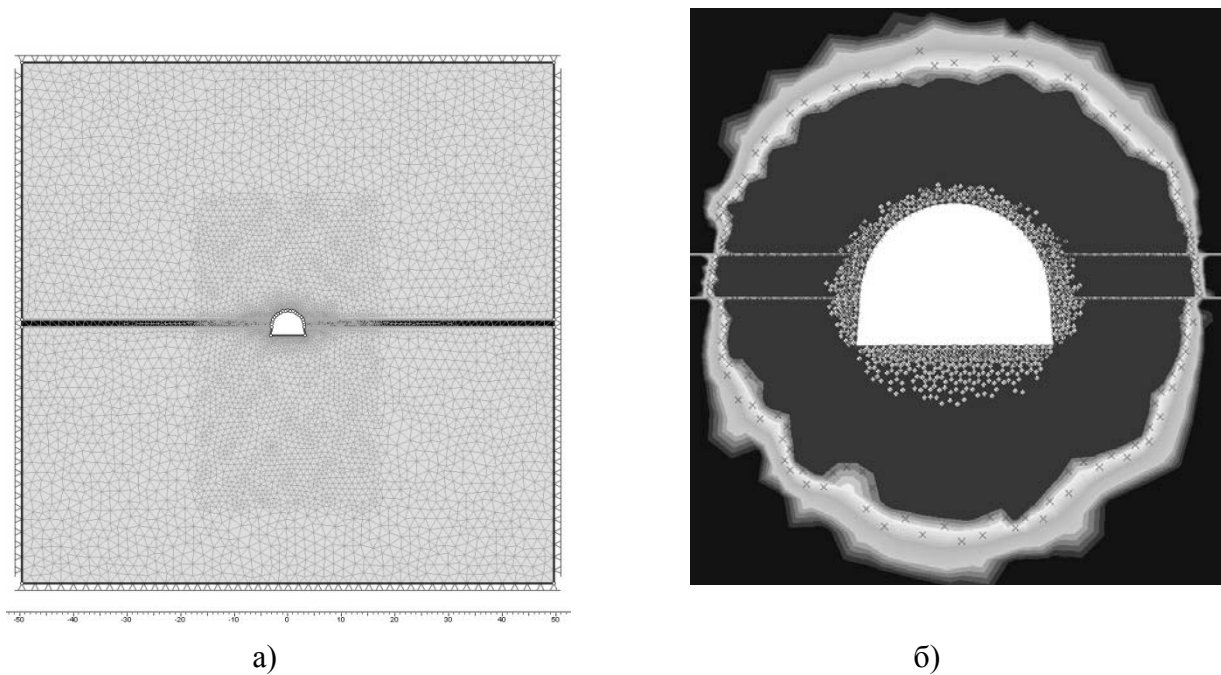


Рис. 3. Расчетная схема и конечно-элементная модель для рассматриваемых условий

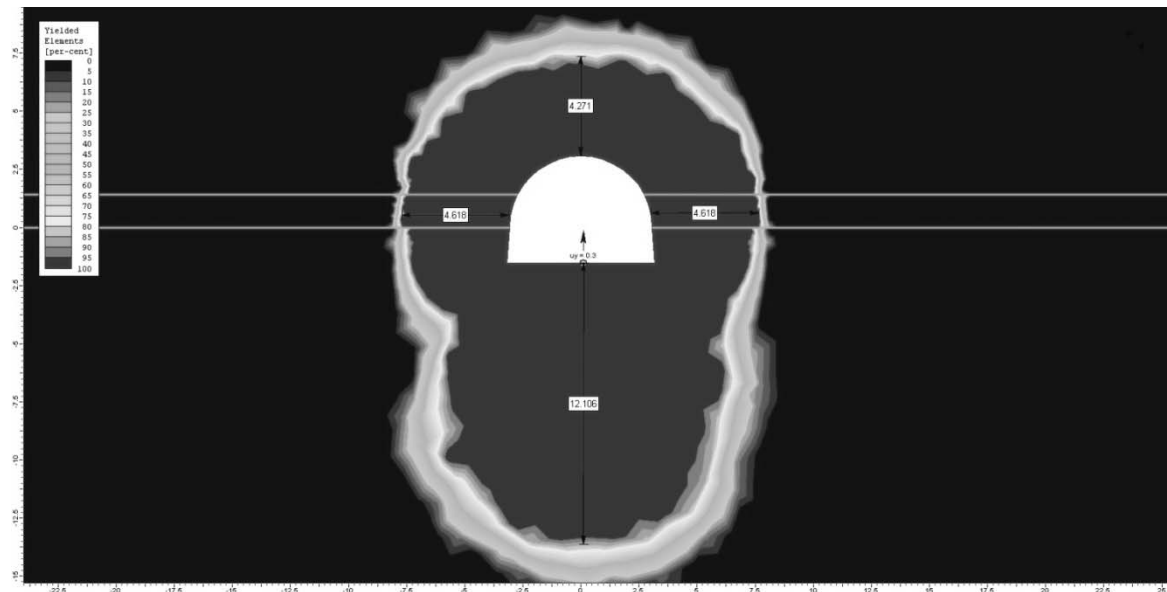


Рис. 4. Конфигурация ЗНД при подъема узла конечно-элементной сетки, расположенного в центре почвы, на 0,01 м.

Закон, по которому происходит развитие геомеханических процессов в окрестности выработки, может носить затухающий характер либо незатухающий характер, что следует из графиков натуральных измерений (рис.5). При этом интенсивность процессов в породах кровли и почвы после точки бифуркации носит различный характер.

На рис. 6 показана точка бифуркации **В** и дальнейшее развитие перемещений в кровле и почве выработке, претерпевающей потерю упругопластической устойчивости. Из него следует, что после некоторого критического момента 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 $8 - 10A_0$, и этот процесс, как уже отмечалось ранее, может носить либо затухающий, либо незатухающий характер.

Обобщения и выводы:

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

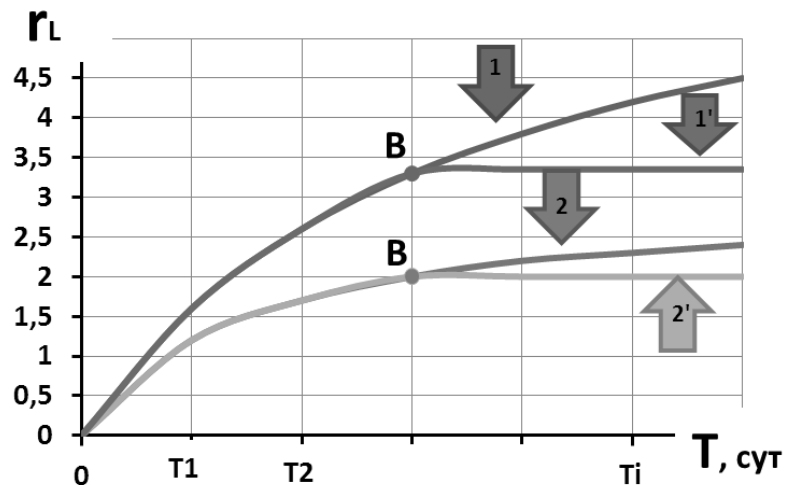


Рис.5. Развитие геомеханических процессов в окрестности выработки: 1 – незатухающий процесс в почве; 1' – незатухающий процесс в кровле; 2 – затухающий процесс в почве; 2' – затухающий процесс в кровле; В – точка бифуркации.

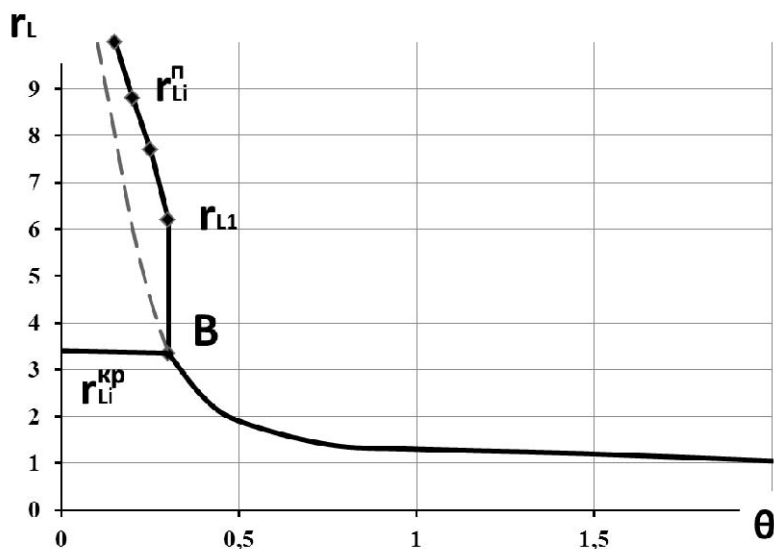


Рис. 6. Дальнейшее развитие перемещений в кровле и почве выработке после достижения точки бифуркации В

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.

Список литературы

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. – 400с.
3. Шашенко А.Н. Устойчивость выработок в неоднородном породном массиве./ Дисс. На соиск. уч. степени докт. техн. наук.- Днепропетровск, 1989. – 415с.
4. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики.- К.: изд-во «Пульсара», 2001г. – 304с.
5. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Прочность и деформируемость массивов горных пород. – Днепропетровск. изд-во НГУ, 2008г. – 215с.