

**Министерство образования и науки Украины**  
**Восточноукраинский национальный университет**  
**имени Владимира Даля**  
*Антрацитовский факультет горного дела и транспорта*

**ПРОБЛЕМЫ ГОРНОГО ДЕЛА  
И ЭКОЛОГИИ ГОРНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

*Материалы IV Международной научно-практической  
конференции 14-15 мая 2009 г., Антрацит*

Норд-Пресс  
Донецк-2009

УДК 622.831.3:622.112.3

**А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин**

## **К ВОПРОСУ О МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЕ РАДИУСА ЗОНЫ НЕ-УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

**Введение.** Добыча полезных ископаемых неразрывно связана с увеличением глубины разработки. При этом существенно увеличивается горное давление, изменяются свойства породной среды, растет геологическая нарушенность месторождений. Ведение горных работ вызывает перераспределение начального поля напряжений, приводит к разрушению массива пород, изменению его пространственной структуры. Все чаще эти процессы носят катастрофический характер, сопровождаются человеческими и материальными потерями.

Наиболее тяжелые последствия проявлений повышенного горного давления в выработках глубоких шахт обусловлены большими деформациями породного массива. При определенных условиях они могут реализовываться чрезвычайно быстро, в динамической форме – горные удары, внезапные выбросы угля, пород и газа. Другие протекают относительно медленно, например, деформация и разрушение крепи, пучение пород почвы, и рассматриваются как статические процессы.

В качестве наиболее характерного проявления больших деформаций приконтурного массива на глубоких горизонтах шахт может быть рассмотрено пучение пород почвы. Несмотря на многочисленные исследования, пучение пород почвы является и сегодня недостаточно изученным явлением. Именно поэтому в техническом плане добиться ощутимых положительных результатов до сих пор не удалось. Одной из причин такой ситуации является то, что предложенные математические и физические модели явления не полностью отражают реальный процесс. Особенно очевидным это стало с переходом горных работ на большие глубины.

**Постановка задачи.** В настоящее время известен целый ряд гипотез, по-разному объясняющих причину и механизм пучения пород почвы. Связывают это явление с набуханием пород под влиянием влаги, выпиранием пород под действием опорного давления в боках выработки, сорбционным набуханием газонасыщенных пористых сред, увеличением объема вследствие разрыхления пород в зоне неупругих деформаций (ЗНД) и т.д.

Рассматривая условия, которые приводят к образованию вокруг выработки больших зон неупругих деформаций, в работах А.Н. Шашенко пучение пород почвы рассмотрено с позиций потери упругопластической устойчивости приконтурного массива и предложена бифуркационная модель пучения (рис. 1). В результате им получен критерий вспучивания, имеющий вид:

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

где  $\bar{\varepsilon}_v$  – среднее значение относительного увеличения объема в пределах ЗНД;  $r_L^*$  – относительный критический радиус области пластических деформаций.

Выражение (1) определяет возможность перехода породного массива вокруг

выработки из одного устойчивого равновесного состояния в другое, сопровождающееся вспучиванием пород почвы. Физическая суть отношения (1) состоит в следующем. В процессе неупругого расширения пород в замкнутом объеме с жесткими внешними размерами ( $r = r_L$ ) происходит перемещение внутреннего контура ( $r = 1$ ). До тех пор, пока эти перемещения не достигнут некоторой критической величины, внутренний контур сохраняет первоначальную форму. При достижении же критических значений перемещений происходит резкое искажение формы внутренней границы, сопровождающееся уменьшением уровня потенциальной энергии в приконтурной зоне и большими перемещениями на контуре выработки. В случае если левая часть выражения (1) меньше нуля, то в выработке произойдет вспучивание пород почвы.

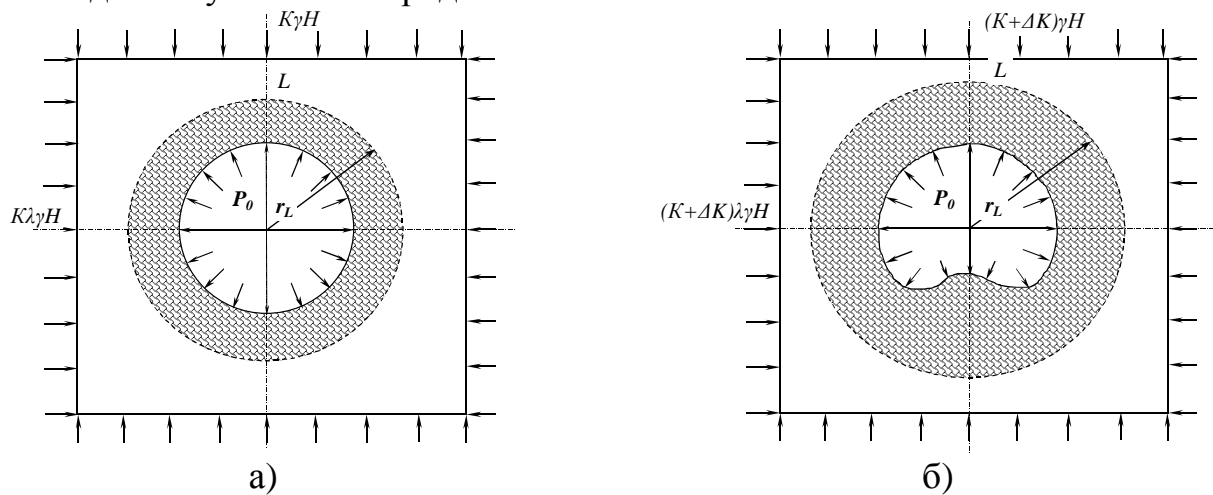


Рис. 1. Расчетная схема к решению задачи о потере упругопластического равновесия приконтурного массива: а – исходное состояние системы ( $r_L < r_L^*$ ); б – возмущенное состояние ( $r_L \geq r_L^*$ );

Важной характеристикой бифуркационной модели является то, что пучение здесь рассматривается как результат общего деформационного процесса вокруг выработки, приводящего к формированию ЗНД, а потеря устойчивости приконтурного массива в виде пучения – как наиболее вероятная реализация этого процесса при достижении критических размеров ЗНД.

Функция связи между величинами, входящими в условие (1), в явном виде аппроксимируется относительно  $r_L^*$  с высокой точностью в пределах реальных значений выражением:

$$r_L^* = 1 + \bar{\epsilon}_v^{-0.4}. \quad (2)$$

Являясь хорошо обоснованным с точки зрения механизма протекания процесса, предложенный критерий не совсем удобен, поскольку определить размеры ЗНД в шахтных условиях практически невозможно. Более удобным показателем для оценки состояния выработки является смещение породного контура, которое легко можно измерить в натурных условиях.

**Целью настоящих исследований** является обоснование критического значения смещений контура выработки  $u^*$ , как показателя потери упругопластической устойчивости массива и определение максимальных размеров ЗНД вокруг одиночной выработки.



$$\text{где } N_{\theta} = \theta \sqrt{\psi + \frac{2(1-\psi)}{\theta}}.$$

Однако предметом настоящих исследований являются такие смещения контура, которые приводят к неуправляемому процессу пучения, существенно влияя на технологические процессы в выработке.

Многими исследователями, занимавшимися проблемами пучения пород почвы выработок (Ю.З. Заславский, В.Т. Глушко, Зорин А.Н., Черняк И.Л., Шестаков Г.П. и др.), а также в ряде отраслевых документов принималась допустимая (критическая) величина смещений пород, не приводящая к тяжелым последствиям (или опасная, вызывающая определенные проблемы и большие затраты на поддержание выработок). Анализ различных источников показал, что такой величиной может быть отношение смещений контура к радиусу выработки  $u^* = U/R_0 = 0,1$ .

На рис. 3, график 2 показана зависимость между относительным увеличением объема и радиусом ЗНД, при величине принятых к рассмотрению относительных смещений.

Аппроксимирующая зависимость, приводящая решение (6) для  $u^*$  к базовому решению для критического радиуса ЗНД  $r_L^*$  (ф. 2, рис. 3, график 1) имеет вид:

$$f(\varepsilon_v) = \left( \frac{3,48}{r_L} \right)^{3,33}. \quad (7)$$

В окончательном виде зависимость критических смещений, соответствующая базовому решению (2) для критического радиуса ЗНД имеет вид (рис. 3, график 3):

$$u_y^* = \frac{\varepsilon_v \left[ \exp \left( -\frac{(1+\lambda)}{2N_{\theta}B} \right) \left( 1 - \frac{(\lambda-1)}{N_{\theta}B} \right) - 1 \right]}{\left( \frac{3,48}{r_L} \right)^{3,33}}. \quad (8)$$

На рис. 4 показаны зависимости критических смещений контура выработки от показателя условий разработки и коэффициента бокового распора.

### О максимальной величине радиуса зоны неупругих деформаций.

Рассматриваемая бифуркационная модель пучения, как форма потери упругопластического равновесия породного массива, предполагает образование вокруг выработки зоны неупругих деформаций значительных размеров. При этом, учитывая, что степень нарушенности пород вокруг выработки зависит от сложности

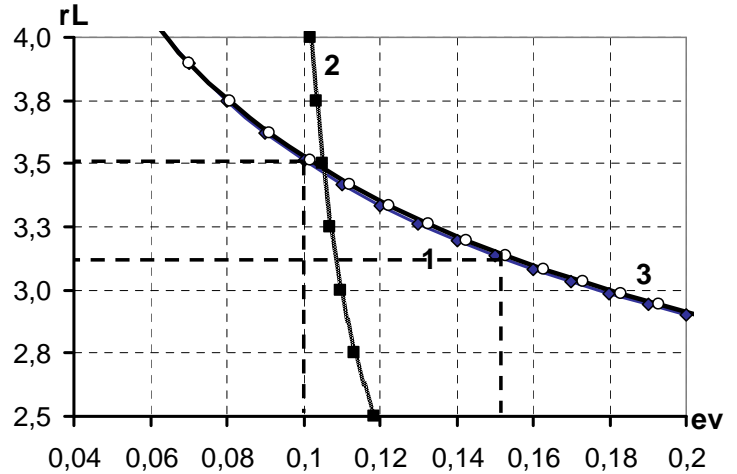


Рис. 3. Зависимость величины объемного расширения пород  $\varepsilon_v$  в ЗНД от его радиуса  $r_L$ : 1 – критерий пучения  $r_L^*$  (ф. 2); 2 – решение для  $u = 0,1$ ; 3 – критерий пучения  $u^*$  (ф. 8)

геомеханических условий, как совокупности ряда геологических и горнотехнических факторов, представляет интерес вопрос о максимально возможной величине радиуса ЗНД.

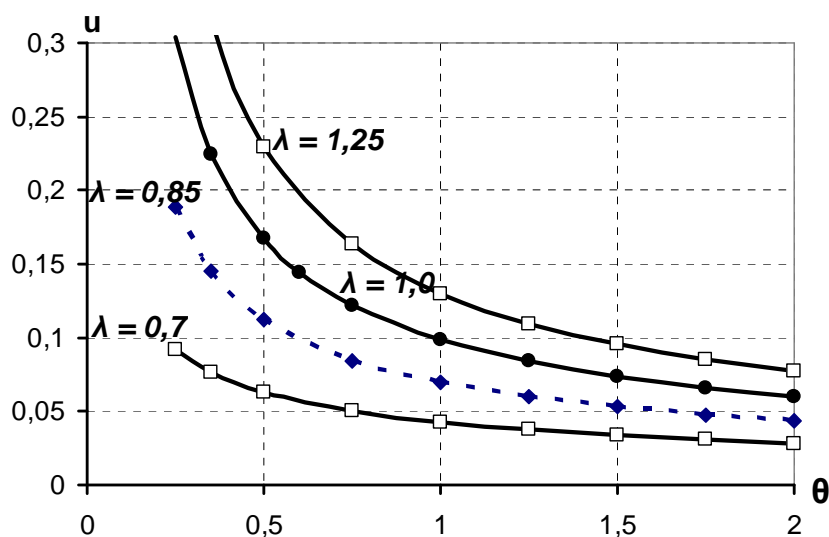


Рис. 4. Зависимость критической величины смещений контура выработки, от показателя условий разработки  $\theta$  и коэффициента бокового распора  $\lambda$

Формирование ЗНД, как отмечается исследователями, происходит по всему контуру выработки. Ее размеры зависят в основном от прочностных свойств слагающих пород, глубины расположения и размеров поперечного сечения выработки. Форма ЗНД определяется соотношением вертикальных и горизонтальных напряжений массива пород, анизотропией пород, углом наклона пластов пород слагающих геологическую толщу

массива. Обычно ЗНД имеет неправильную форму, близкую к окружности или эллипсу с большим радиусом, направленным в сторону менее слабых пород и перпендикулярно налестованию. Степень нарушенности пород в пределах ЗНД максимальна на контуре выработки и уменьшается вглубь массива. Логичным было бы предположить, что в условиях незначительного отпора крепи (что наблюдается довольно часто в практике эксплуатации выработок), приконтурный массив мог бы беспрепятственно разрыхляться, и смещаясь внутрь выработки заполнить ее полностью. При этом степень разрыхления и размеры ЗНД принимали бы максимальные значения.

Ряд аналитических исследований дают именно такие результаты. Как отмечает Ю.М. Либерман, при  $P \rightarrow 0$  радиус ЗНД и смещение контура стремятся к бесконечности. Он объясняет это тем, что незакрепленная выработка не может находиться в нормальном состоянии, так как при малой реакции крепи в кровле возникнут обширные вывалы породы. По мнению В.В. Виноградова [2], причина потери устойчивости при  $P \rightarrow 0$  не в природе взаимодействия системы «крепь-массив», а в формальности принятых Ю.М. Либерманом соотношений, описывающих разупрочнение массива вблизи выработки. А. Лабасс подчеркивает, что размер ЗНД должен определяться на основе шахтных исследований [3]. Однако, выполнение таких исследований представляет большие сложности, а результаты не могут быть оценены однозначно.

Авторами работы [4] на основе обобщения результатов аналитических и экспериментальных исследований, учитывающих основные влияющие факторы процесса разрушения окружающего выработку массива предложена классификация устойчивости пород в подземных выработках. Критерием является показатель  $R_{max}$  – расстояние от контура выработки до наиболее удаленной границы разру-

шения. К категории «сильно неустойчивых пород» относят такие, локальные размеры ЗНД которых  $R_{max} > 4$  м. Форма проявления горного давления этой категории характеризуется разрушениями на большей части контура выработки, породы в области руинного разрушения находятся в полностью разрушенном и неустойчивом состоянии.

Между тем, как показывает опыт поддержания выработок в условиях больших глубин разработки и сложных геомеханических условиях, потеря их устойчивого состояния происходит не в форме равномерного деформирования массива по всему периметру, а в виде пучения почвы и вывалообразования, т.е. процессов, локальных по зоне их проявления, но являющихся результатом общего деформационного процесса в окружающем выработку массиве.

Бифуркационная теория пучения объясняет это явление потерей упругопластической устойчивости породного массива вокруг выработки. В соответствии с (1 и 8), определяющими параметрами процесса являются размеры ЗНД  $r_L^*$ , объемное расширение пород в этой зоне  $\bar{\epsilon}_v$  (или коэффициент разрыхления  $k_p = 1 + \bar{\epsilon}_v$ ) и смещения контура выработки  $u^*$ .

Максимальные коэффициенты разрыхления пород вокруг выработки наблюдаются после ее перекрепления позади очистного забоя. Размеры зоны разрушенных пород в зоне влияния очистных работ при повторном использовании выработки достигают 15 м и более, а коэффициенты разрыхления отдельных слоев пород – 1,2. Коэффициент разрыхления метрового слоя у контура иногда достигает 1,3. Тем не менее, средний коэффициент зоны разрушения по результатам многочисленных шахтных исследований составляет  $k_p = 1,1 \dots 1,15$ .

Сопоставляя зависимость критического значения радиуса ЗНД  $r_L^*$  - критерия вспучивания при соответствующих ему значениях объемного расширения пород  $\bar{\epsilon}_v$  (рис. 3), получим для  $\bar{\epsilon}_v = 0,1 \dots 0,15$  ( $k_p = 1,1 \dots 1,15$ ) максимальные размеры ЗНД  $r_L = 3,1 \dots 3,5$ .

#### **Выводы.**

1. На основе решения задачи о критическом радиусе ЗНД - критерия вспучивания при представлении явления пучения пород почвы, как факта потери упругопластической устойчивости породного массива, предложен более удобный с практической точки зрения критерий вспучивания – критические смещения пород почвы.

2. Величина критических смещений контура выработки, как критерий упругопластической устойчивости массива, нелинейно зависит от показателя условий разработки и коэффициента бокового давления и обратно пропорционален их величинам.

3. При увеличении коэффициента бокового распора, критические смещения, приводящие к потере устойчивости приконтурного массива, увеличиваются.

4. Критическая величина смещений контура при увеличении показателя условий разработки  $\theta$  снижается, т.е. при более прочных породах, а также с увеличением глубины разработки, потеря упругопластической устойчивости может происходить при меньших значениях  $u^*$  и, очевидно, более интенсивно – подобно хрупкому разрушению.

5. Максимальные относительные размеры ЗНД при соответствующих значениях разрыхления пород составляют  $r_L = 3,1 \dots 3,5$ , после чего возникают такие проявления горного давления как пучение или вывалообразование.

### Библиографический список

1. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.04, 05.15.11. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.
2. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. - Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Расчет крепи шахтных стволов / Руппенейт К.В., Либерман Ю.М., Матвиенко В.В. и др. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 124 с.
4. Кириченко В.Я., Рубец Г.Т., Соколовский В.И. Аналитическое описание зон разрушения пород вокруг длительно эксплуатируемых горных выработок // Геотехническая механика. – Днепропетровск, ИГТМ НАН Украины, 2006. – Вып. 61. – С. 149-173.

*Рекомендована к публикации д.т.н. А.Н. Роечко 27.04.09*

На підставі базового розв'язання задачі щодо критичного радіусу зони непружних деформацій, як критерію здимання порід підшови виробок, запропонований більш практичний критерій, оснований на критичному значенні зміщень порід підшови. Отримано залежності критичної величини зміщень підшови від основних гірничо-геологічних факторів. Встановлені максимальні розміри зон нупружних деформацій при ідповідних значеннях розпушення порід в масиві навколо виробки.

На основе базового решения задачи о критическом радиусе зоны неупругих деформаций, как критерия вспучивания пород почвы выработок, предложен более практичный критерий, основанный на критической величине смещений пород почвы. Получены зависимости критической величины смещений почвы от основных горно-геологических показателей. Установлены максимальные размеры зоны неупругих деформаций при соответствующих значениях разрыхления пород в окружающем выработку массиве.

On the basis of the base decision of a problem on critical radius of a zone of inelastic deformations as criterion of a up warp the rock of ground of developments, more practical criterion based on critical size of displacement of rock of ground is offered. Dependences of critical size of displacement of ground on the basic mountain-geological parameters are received. The maximal sizes of zone of inelastic deformations are set at the proper values of making light of rocks in an around workings.