

УДК 622.02.001.57:539.373

**С.Н. Гапеев, И.Ю. Старотиторов**

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ  
ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Семинар № 3

---

**О**беспечение устойчивости и безопасного состояния протяженных горных выработок является одной из актуальных задач на угледобывающих предприятиях Украины. На устойчивость выработки влияет ряд факторов различного характера, например, особенности структуры и текстуры массива, его обводненность и др., учесть которые во всей совокупности в рамках теоретических моделей не представляется возможным. Поэтому к моделям, которые используются в ходе оценки устойчивости выработок в гетерогенном породном массиве, предъявляется требование наибольшей адекватности реальным условиям заложения конкретной выработки. Снять ряд математических ограничений и получить результаты с приемлемой для инженерных задач точностью позволяют численные методы исследования, например, метод конечных элементов.

Комплексный подход к оценке состояния выработки, включающий натурные измерения, лабораторный эксперимент и численное компьютерное моделирование, был применен при прогнозировании устойчивости протяженной выработки, пройденной по трещиноватым породам. Штрек сооружался с применением стандартной методики (без научного сопровождения и прогнозирования состояния выработки). После проходки на почти

полную длину состояние выработки на некоторых участках стало настолько неудовлетворительным из-за частых вывалов из кровли выработки и пучения почвы, что дальнейшую проходку пришлось остановить и выбрать новую трассу для продолжения строительства.

Анализ имеющихся данных о горно-геологических условиях по выбранной (новой) трассе и данные об условиях по старой трассе позволил выделить характерные участки, на которых следовало ожидать различную устойчивость выработки:

I – участок старой трассы, на котором штрек был подвержен значительным деформациям, вывалам боковых пород и пучению почвы;

II – начальный участок новой трассы, анализ условий на котором не выявил каких-либо особенностей структуры массива или геологических осложнений;

III – участок новой трассы с флексурой, на котором анализ условий показал возможность присутствия флексурной складки в непосредственной близости от проводимой выработки и потому оказывающей влияние на ее устойчивость;

IV – участок новой трассы, на котором возможно расположение выработки в массиве с меньшей крепостью и большей трещиноватостью, чем в предыдущих условиях.

Для оценки состояния штрека по новой трассе с привлечением метода методом конечных элементов было выполнено компьютерное моделирование с целью определения размеров и конфигурации зон неупругих деформаций (ЗНД) на различных участках (I – IV) трассы.

Задача решалась в два этапа. На первом этапе определялась ЗНД по результатам расчета компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) на каждом из выбранных участков выработки, которое выполнялось в упругой постановке. На втором этапе размеры и конфигурация ЗНД уточнялись по упругопластическому алгоритму, учитывающему эффект разупрочнения массива в пределах ЗНД, что имеет место в реальных условиях [1]. Алгоритм проведения двухэтапного решения задачи об НДС массива с выработкой подробно описан в [2, 3].

Физико-механические свойства пород при решении задачи были приняты по данным лабораторных испытаний породных образцов правильной геометрической формы. Однако реальный массив обладает существенной неоднородностью, причем размеры дефектов массива могут превосходить размеры стандартных образцов, что приведет к неучету ослабляющего действия дефектов на прочность всего массива. Например, для третьей геомеханической ситуации, рассматриваемой в настоящей задаче – ослабляющее действие флексуры на устойчивость массива.

Для описания структурно-механического ослабления массива принято существующее в геомеханике понятие о влиянии масштабного эффекта, суть которого сводится к тому, что прочность породного массива всегда ниже, чем прочность образца. Это отличие оценивается коэффициентом

структурно-механического ослабления, который численно равен [4]:

$$k_c = \frac{\exp(\arg \Phi(1-p) \cdot \sqrt{\ln(\eta^2 + 1)})}{\sqrt{\eta^2 + 1}}, \quad (1)$$

где  $\arg \Phi(1-p)$  – аргумент функции Лапласа (нормального распределения) при ее значении, равном  $(1-p)$ . Функция протабулирована в [5];  $p$  – уровень надежности вероятности;  $\eta$  – коэффициент вариации прочности массива [4]:

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

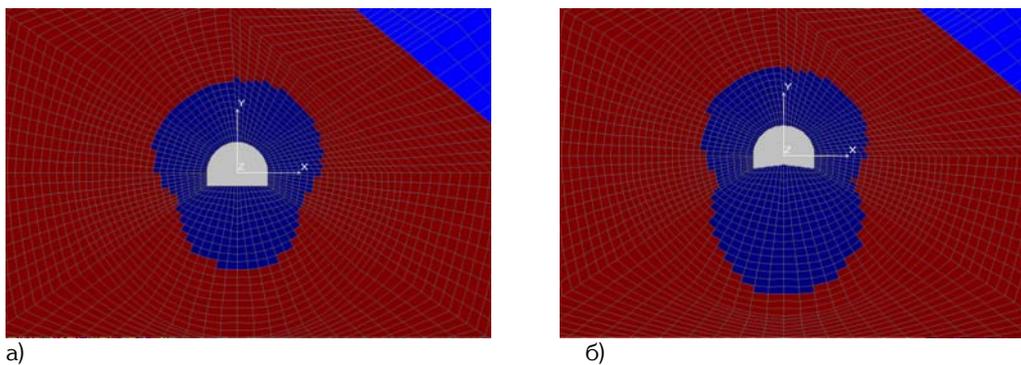
где  $l_T$  – среднее расстояние между трещинами в массиве (по данным геологической службы), см;  $l_0$  – характерный размер стандартного породного образца, см;  $\eta_0$  – коэффициент вариации прочности образцов при испытаниях на одноосное сжатие [6].

Коэффициенты структурного ослабления, вычисленные по приведенным формулам для каждого из четырех участков выработки, имели различные числовые значения – 0,18 (для участка I) до 0,3 (для участка II).

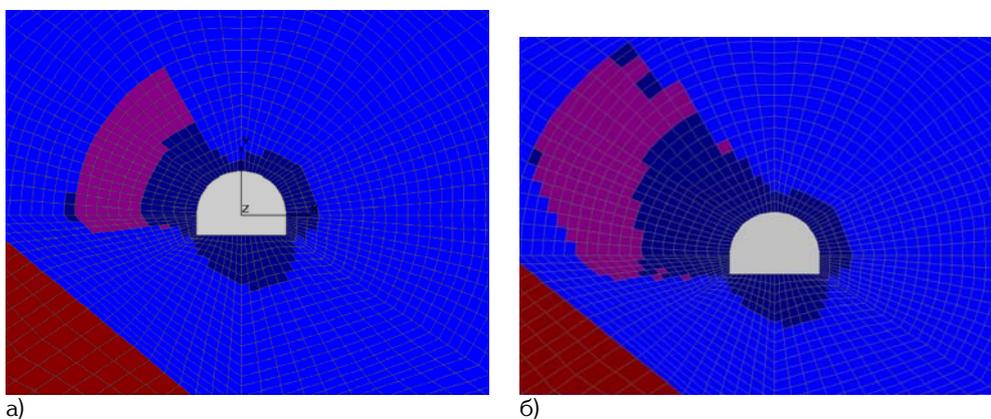
В результате обработки полученных данных после первого этапа расчета построены ЗНД в окрестности выработок в каждом из четырех случаев.

После проведения второго этапа расчета размеры зон в случаях II – IV, т.е. по новой трассе, не претерпели видимых изменений. В случае I, т.е. по старой трассе, имело место искажение контура на почве выработки, что отразилось на размерах и форме зоны неупругих деформаций (рис. 1) – она приобрела более вытянутую форму со стороны почвы выработки.

В случаях III и IV зона неупругих деформаций имеет максимальные размеры в направлении ослабленных участков (рис. 2).



**Рис. 1. Зона разрыхления для участка I (а – после упругого решения, б – после упругопластического решения)**



**Рис. 2. Зоны разрыхления для участков III (а) и IV (б)**

Однако такая оценка является качественной. Для получения количественной характеристики был использован коэффициент устойчивости выработки, определяемый отношением [4]

$$K_y = \frac{r_L^*}{r_L}, \quad (3)$$

где  $r_L$  – радиус зоны неупругих деформаций, отнесенный к радиусу выработки;  $r_L^*$  – критический радиус зоны неупругих деформаций, отнесенный к радиусу выработки.

Величина  $r_L^*$  введена в [7] при исследовании возможности вспучивания

почвы в различных горно-геологических условиях.  $r_L^*$  является таким радиусом зоны разрушения, при котором выполняется условие критического состояния почвы с точки зрения потери ее устойчивости (вспучивания):

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* + 2 = 0, \quad (4)$$

где  $\bar{\varepsilon}_v$  – среднее относительное увеличение объема материала породного массива.

Таким образом, критерий (3) оценивает устойчивость выработки с учетом возможности вспучивания почвы. При  $K_y = 1$  выработка находится в

**Результаты сравнительного анализа аналитических и численных результатов**

Уча- сток	$r_L$			$r_L^*$	$K_y$		
	расчетн.	экспе- рим.	$\Delta$ , %		по рас- четн.	по экспе- рим.	$\Delta$ , %
I	2,98	3,28	10,1	2,84	0,95	0,87	8,4
II	1,58	1,60	1,3	3,25	2,06	2,03	1,5
III	1,74	1,73	0,6	3,10	1,78	1,79	0,6
IV	2,04	2,14	14,0	2,74	1,34	1,28	4,5

критическом состоянии с точки зрения потери устойчивости почвы, при  $K_y < 1$  произойдет потеря устойчивости почвы выработки (вспучивание). Чем выше величина  $K_y$ , тем в более устойчивом состоянии находится выработка.

В ходе обработки и анализа результатов численного эксперимента производилось сравнение величин  $r_L$ , вычисленных по координатам узлов элементов, входящих в зону разрыхления и находящихся на ее внешней границе, и определенных по графику зависимости (рис. 3) [4]

$$r_L = f\left(\frac{R_c k_c}{\gamma H}\right)$$

где  $\frac{R_c k_c}{\gamma H}$  – показатель условий разработки;  $\gamma$  – объемный вес пород;  $H$  – глубина заложения выработки;  $R_c$  – предел прочности на сжатие материала массива;  $k_c$  – коэффициент структурно-механического ослабления массива, вычисляемый по формуле (1) с учетом (2).

Далее сравнивались величины коэффициента устойчивости  $K_y$ , вычисленные по аналитическим и численным значениям  $r_L$ .

При этом величина  $r_L^*$  определялась по формуле, полученной из (4) [4]:

$$r_L^* = 1 + (\bar{\varepsilon}_v)^{-0,4},$$

$$\text{где } \bar{\varepsilon}_v = 2\varepsilon_v^* \left[ 1 - \frac{2r_L^2 \ln r_L}{(r_L^2 - 1)^2} \right],$$

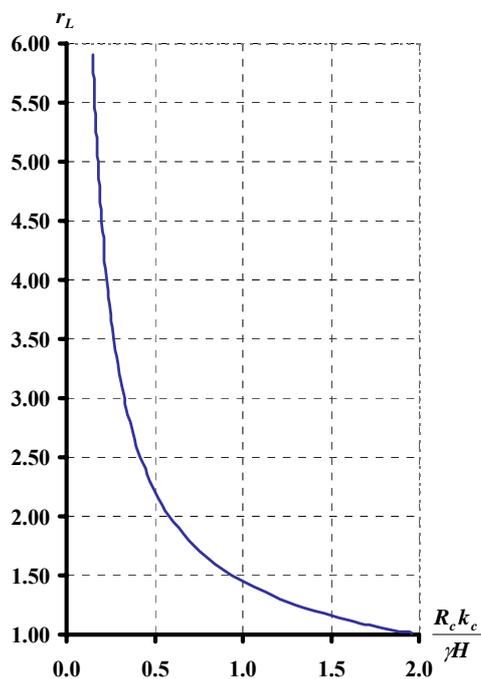
где  $\varepsilon_v^*$  – максимальное относительное увеличение объема, а значение  $r_L$  определялось по рис. 3.

Результаты сравнительного анализа численных и аналитических расчетов сведены в таблицу.

Как видно из таблицы, наблюдается хорошая сходимость результатов аналитического и численного решения.

Коэффициент устойчивости на каждом из исследуемых участков принимает различные численные значения. На участке I величина  $K_y$  имеет наименьшее значение, причем меньше единицы, т.е. на этом участке следует ожидать пучение почвы, а общая устойчивость выработки будет наименьшей из четырех рассматриваемых геомеханических ситуаций.

На участке II, напротив, значение  $K_y$  принимает наибольшее значение, что свидетельствует о наилучшей из 4-х случаев общей устойчивости выработки, пучения на этом участке не предвидится ( $K_y \gg 1$ ). Хотя на участках III и IV, занимающих промежуточное положение, пучения не ожидается ( $K_y > 1$ ), общая устойчивость



**Рис. 3. Зависимость величины  $r_L$  от величины показателя условий разрабатки  $\frac{R_c k_c}{\gamma H}$**

участков различна: судя по величинам  $K_y$ , на участке IV вероятно значительное давление на крепь со стороны ослабленной зоны, что негативно сказывается на состоянии выработки ( $K_y$  ближе к 1); на участке III также ожидается усиление горного давления, хотя и не такой интенсивности, состояние выработки на этом участке будет несколько лучше по сравнению с участком IV ( $K_y$  ближе к 2).

Последующее обследование выработки в ходе ее проведения показало, что имеет место совпадение результатов компьютерного прогноза и реального состояния выработки: в наилучшем состоянии находится начальный участок новой трассы, в наихудшем – участок старой трассы, где наблюдалось вспучивание почвы; на участке с флексурой имело место повышенное давление на крепь, выражающееся в срабатывании замков на значитель-

ную величину; на участке с рудой повышенное давление приводит к деформациям крепи. Пучение наблюдается только на одном участке – старой трассы.

Таким образом, использование компьютерного моделирования НДС массива, вмещающего протяженную выработку, позволяет прогнозировать ее состояние на каждом из участков, в пределах которых массив обладает структурными и текстурными особенностями, при этом величина коэффициента  $K_y$  выступает критерием, позволяющим оценивать общую устойчивость выработки с учетом упруго-пластической устойчивости почвы.

Комплексная методика оценки устойчивости протяженных выработок на основе компьютерных моделей в силу общего характера применима в любых горно-геологических условиях для любых выработок, как в угольных шахтах, так и в рудных. На основании результатов компьютерного моделирования возможна разработка рекомендаций по выбору типа, параметров крепи и конфигурации выработки, направленных на снижение эксплуатационных затрат при обслуживании выработки.

Так, например, компьютерный прогноз состояния выработки совместно с геофизическим обследованием и системой специальных экспертных оценок применен для выбора и обоснования мероприятий по обеспечению длительной устойчивости дренажного квершлага гор. 708 м ОАО «Шахта «Красноармейская-Западная №1», подверженного вывалом, значи-

тельным деформациям крепи и сильному пучению пород почвы.

Компьютерное моделирование геомеханических ситуаций в подготовительных выработках нашло применение на ряде шахт ГП «Добропольеуголь»: на шахте «Добропольская» – при разработке мероприятий по проведению и поддержанию выработок вблизи геологических нарушений; на шахтах «Белозерская» и «Новодонецкая» – при разработке мероприятий по обеспечению длительной устойчивости протяженных выработок в условиях сильно пучащих пород почвы; на шахте «Алмазная» – при обоснова-

нии параметров анкерного крепления наклонных капитальных выработок.

Таким образом, компьютерная оценка устойчивости должна стать неотъемлемой частью научно обоснованной методики проектирования протяженных выработок, имеющих длительный срок эксплуатации и проводимых в сложных горно-геологических условиях. Применение такой методики уже на стадии проектирования позволит при эксплуатации выработок значительно сократить расходы на ремонтные работы, и подрывку почвы, снизить металлоемкость крепи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов В.В.* Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. *Шашенко А.Н., Гапеев С.Н., Янко В.И.* Численное моделирование процесса потери упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки // Сб. науч. тр. НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2002. – №15, том 1. – С.29-34.
3. *Гапеев С.Н., Лозовский С.П., Рязанцев А.П.* Компьютерное моделирование процесса пучения пород почвы в подготовительных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – №10. – С.99-101.
4. *Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А.* Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Універ. вид-во «Пулсари», 2002. – 304 с.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1967. – 576 с.
6. *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова.* – М.: Недра, 1975. – 279 с.
7. *Шашенко А.Н.* Упругопластическая задача для структурно-неоднородного массива, ослабленного круглой выработкой // Прикладная механика. – 1989. – №6. – С. 48-54. **ТИАБ**

#### Коротко об авторах

*Гапеев С.Н., Старотиторов И.Ю.* – Национальный горный университет, г. Днепропетровск.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник*

