

УДК 622.232

Канд. техн. наук БЕГИЧЕВ С. В., канд. техн. наук ГАПЕЕВ С. Н. (НГУ, Днепропетровск)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В КРАЕВОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА

**Введение.** Техногенное деформирование породного массива вызывает самопроизвольное формирование высоконагруженных зон вокруг создаваемых полостей. Первичное разрушение проводится, целенаправленно, с применением специальных средств, и как следствие, в результате резкого возрастания напряжений на контуре обнажения породного массива, процесс дезинтеграции, одновременно, развивается самопроизвольно во все стороны с различной степенью интенсивности. При этом в глубине массива формируется зональная структура напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающих пород.

Исследованиями [1, 2] установлено, что в породном массиве, вмещающем протяженные горные выработки, образуется приконтурная зона, характеризующаяся периодическим распределением НДС пород. Согласно этим исследованиям вдоль выработки формируются квазицилиндрические структуры пород в неупругом и упруго напряженном состоянии.

В работах [3–5] в результате анализа эмпирических данных установлено, что после окончания очистных работ вдоль их границы в породном массиве краевой части разрабатываемого угольного пласта также происходит образование зональной структуры с периодическим расположением пород в неупругом и упруго напряженном состоянии. На основании этого область массива краевой части, которая подвержена указанным характерным проявлениям опорного давления, выделена как приграничная зона [6]. Поле напряжений в этих зонах обладает волновым характером распределения, с затухающей амплитудой к их границе и длительным периодом её существования, что является показателем процесса самоорганизации новой системы – «породный массив приграничной зоны». При внедрении в рассматриваемую область породного массива краевой части протяженной горной выработки происходит взаимодействие двух систем – «горная выработка» и «породный массив приграничной зоны».

Для изучения, сформировавшегося в результате внедрения протяженной горной выработки, НДС породного массива в её окрестности проведены исследования с привлечением численного метода конечных элементов.

**Цель выполняемых исследований** – получение картин распределения компонентов напряжений и деформаций в окрестности протяженной выработки, а также зоны неупругих деформаций, окружающей выработку.

В качестве метода исследований принят приближенный численный метод конечных элементов [7], достаточно широко используемый в настоящее время для решения задач геомеханики породных массивов.

В расчете учитываются результаты замеров на контурных станциях (рис. 1), установленных в конвейерном штреке центрального уклона II ступени, проведенного для подготовки 11-й лавы пласта  $l_3$  в условиях шахты Краснолиманская. Проведение штрека осуществлялось в соответствии с проектом, комбайновым способом. Крепление выработки выполнено крепью КСП-32 с постоянным шагом 0,3 м.

Количество замерных станций 1-й группы, принятых для расчета – семь. Каждая станция расположена на различном расстоянии от границы очистных работ и предназначена для инструментального фиксирования вертикальной и горизонтальной конвергенции контура выработки в соответствующей плоскости сечения породного массива приграничной зоны краевой части разрабатываемого угольного пласта  $l_3$ . Расстояние между станциями 10 м, а их расположение показано на рис. 2.

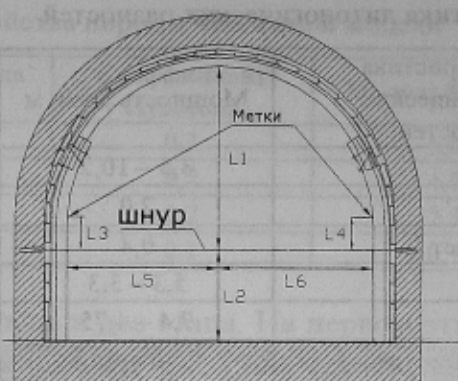


Рис. 1. Схема наблюдательной станции

**Расчетная схема и методика выполнения исследований.** В настоящем эксперименте рассматривается ряд плоских сечений, соответствующих сечениям выработки по замерным станциям. Таким образом, рассматривается семь сечений выработки, из которых пять (№№ 1–5), расположены в породах приграничной зоны, а два в зоне разгрузки. Моделировался слоистый массив, имитирующий углевещающую толщу пород пласта  $l_3$ , который согласно горно-геологическому прогнозу характеризуется неустойчивым характером пород непосредственной кровли, склонной к обрушению – Б-2 и среднеустойчивой непосредственной почвой, породы которой склонны к пучению – П-2 [8].

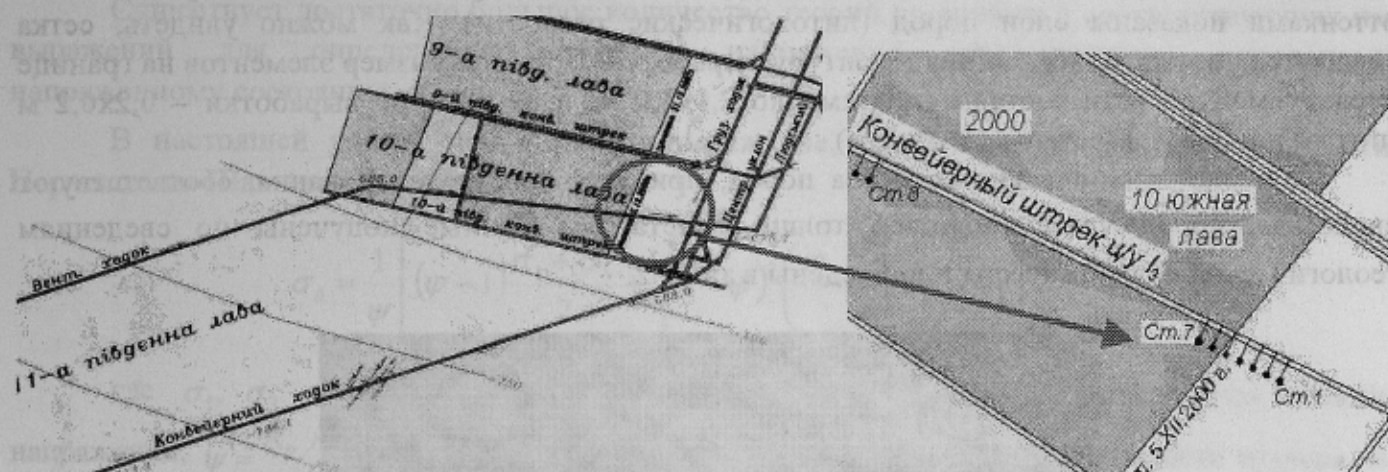


Рис.2. Расположение 1-й группы наблюдательных станций

Угольный пласт сложного строения состоит из двух угольных пачек и породной прослойки средней мощности – 2м ( $\sigma_{сж} = 10-15$  МПа). Породы, слагающие кровлю и почву пласта  $l_3$ , представлены в таблице 1.

Породный массив в окрестности выработки моделировался пластиной с вырезом в форме выработки. Размеры выработки соответствуют размерам конвейерного штрека (т.е. 4,23 м ширина в свету и 3,13 м высота в свету). Отброшенная часть массива заменялась нагрузкой, по величине равной  $\mathcal{H}$ . Оставшиеся граничные условия – запрет перемещений по вертикали, заданный по нижней кромке пластины. Величина фактических перемещений, зафиксированная на каждой из замерных станций, учитывалась в соответствующей численной модели введением этой величины в граничные условия, задаваемые на контуре выработки.

Породный массив моделировался плоскими четырехугольными твердотельными элементами. При этом общее количество конечных элементов в задаче составило 10024. Количество узлов – 10272.

Табл.1 Характеристика литологических разностей

№ слоя	Характеристика литологических разностей	Мощность слоя, м	$\sigma_{сж}$ МПа
1	Алевролит	3,5 – 10,2	40-60
2	Аргиллит	2,0	20-40
3	Угольный пласт $l_3^1$	0,4	10-15
4	Алевролит	5,3 – 3,3	20-40
5	Аргиллит	7,4 – 4,75	18-30
6	Угольный пласт $l_3$	0,88 – 1,15 (0,03 – 0,04) 1,04 – 1,15	10-15
7	Алевролит	2,1 – 1,5	20-40
8	Песчаник	1,5 – 2,0	70-80
9	Алевролит	0,0 – 1,0	40-60
10	Угольный пласт $l_2^2$	0,04 – 0,25	10-12
11	Алевролит «кучерявичку»	0,3 – 0,5	20-30
12	Алевролит	2,0	40-60
13	Песчаник	5,0	70-80

На рис. 3 одновременно представлена расчетная схема в виде сетки конечных элементов и структурная схема моделируемого слоистого массива, где различными оттенками показаны слои пород (литологические разности). Как можно увидеть, сетка сгущается по мере приближения к контуру выработки. При этом размер элементов на границе исследуемой области составляет примерно 2,0x1,0 м, а на контуре выработки – 0,2x0,2 м (почва) и 0,2x0,7 м (остальной контур).

Физико-механические свойства пород, принятые для моделирования, соответствуют свойствам пород углевмещающей толщи пласта  $l_3$ . Данные получены по сведениям геологической службы шахты и приведены в табл. 2.

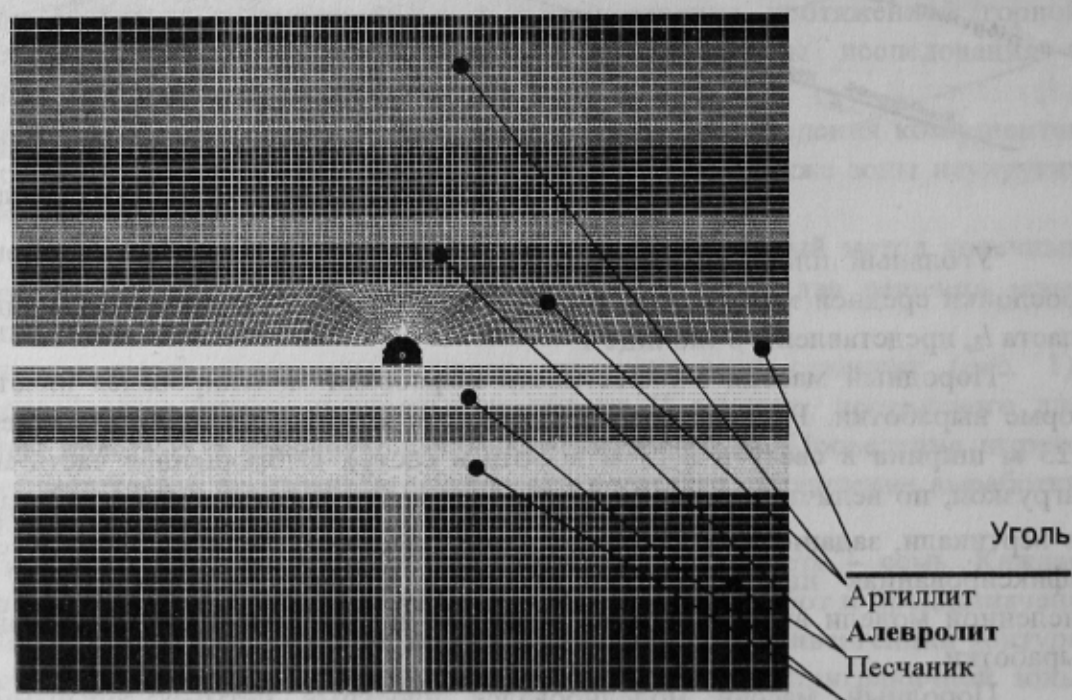


Рис. 3. Расчетная схема с сеткой элементов и расположением слоев пород в модели

Табл. 2 Физико-механические свойства пород в численной модели

Порода	Предел прочности на сжатие, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>
Аргиллит	20,0–40,0	0,3	$6,0 \cdot 10^3$	2,5
Алевролит	40,0–60,0	0,2	$4,0 \cdot 10^4$	2,5
Песчаник	70,0–80,0	0,2	$2,5 \cdot 10^4$	2,5
Уголь	10,0–15,0	0,1	$0,7 \cdot 10^3$	1,3

Решение задач выполнялось в два этапа. На первом этапе решалась численная задача, результатом которой являлись картины распределения компонентов напряжений и деформаций породного массива в окрестности выработки в плоскости сечения каждой наблюдательной станции. На рис. 4–8 приведены картины распределения нормальных компонент поля напряжений ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) в плоскости первых пяти станций, расположенных в породах приграничной зоны краевой части разрабатываемого пласта  $l_3$ .

На втором этапе решения производилась обработка полученного числового материала с целью определения набора конечных элементов, в которых выполняется условие прочности [9]:

$$\sigma_e > R_c, \quad (1)$$

где  $R_c$  – предел прочности породы на одноосное сжатие;  $\sigma_e$  – величина эквивалентных напряжений, действующих в отдельном элементе.

Существует достаточно большое количество теорий прочности и соответствующих им выражений для определения величины напряжения эквивалентного одноосному напряженному состоянию  $\sigma_a$ .

В настоящей работе использовано выражение, полученное из условия прочности Парчевского-Шашенко, имеющее вид [10]:

$$\sigma_a = \frac{1}{\psi} \left[ (\psi - 1) \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \sqrt{(1 - \psi)^2 \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + 4\psi \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2} \right],$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – соответственно максимальный и минимальный компоненты тензора напряжений;  $\psi = \frac{R_p}{R_c}$  – коэффициент хрупкости породы;  $R_p$  – предел прочности породы на растяжение. В расчете принималось  $\psi = 0,1$ , что хорошо согласуется с испытаниями пород углевещающей толщ, проведенными в лабораторных условиях многими исследователями [9].

Выполнение условия (1) говорит о разрушении материала в пределах конечного элемента. Совокупность таких элементов формирует зону неупругих деформаций (зону разрушения). От размеров этой зоны зависит величина смещений на контуре выработки, и как следствие – нагрузка на крепь.

Из представленных рисунков (рис. 4–8) видно, что картины распределения компонент напряжений в окрестности выработки меняются в зависимости от положения плоскости сечения породного массива краевой части, относительно границы очистных работ. Рассмотрим последовательно изменение вертикальной компоненты поля напряжений  $\sigma_y$ , как наиболее существенную составляющую поля напряжений, которая влияет на деформирование контура выработки.

Так, на станции 1, наиболее удаленной от границы отработанной лавы (рис. 4), наблюдается величина вертикальной компоненты сжимающих напряжений, которая имеет наименьшее по величине из представленных сечений. Максимальные сжимающие напряжения локализуются в породах почвы по углам выработки. В центре подошвы выработки сформировалась зона растягивающих напряжений.

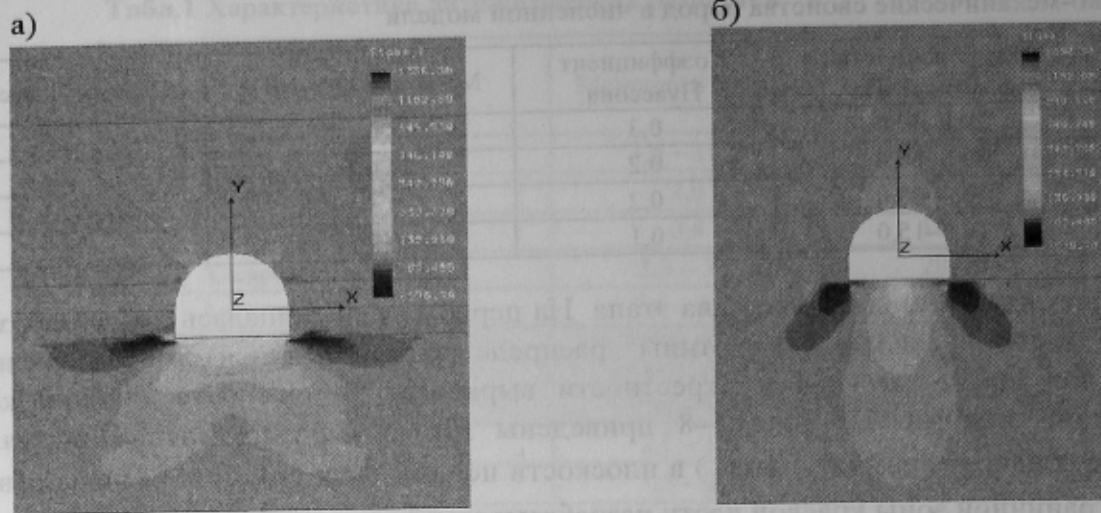


Рис. 4. Компоненты напряжений в модели породного массива в окрестности выработки на станции 1:  
а).  $\sigma_X$ ; б).  $\sigma_Y$ .

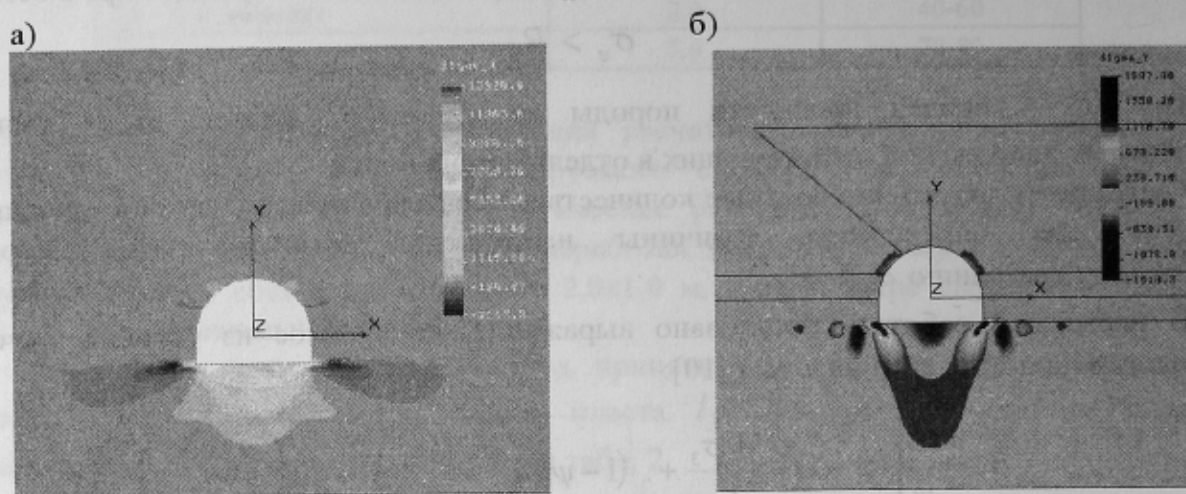


Рис. 5. Компоненты напряжений в модели породного массива в окрестности выработки на станции 2:  
а).  $\sigma_X$ ; б).  $\sigma_Y$ .

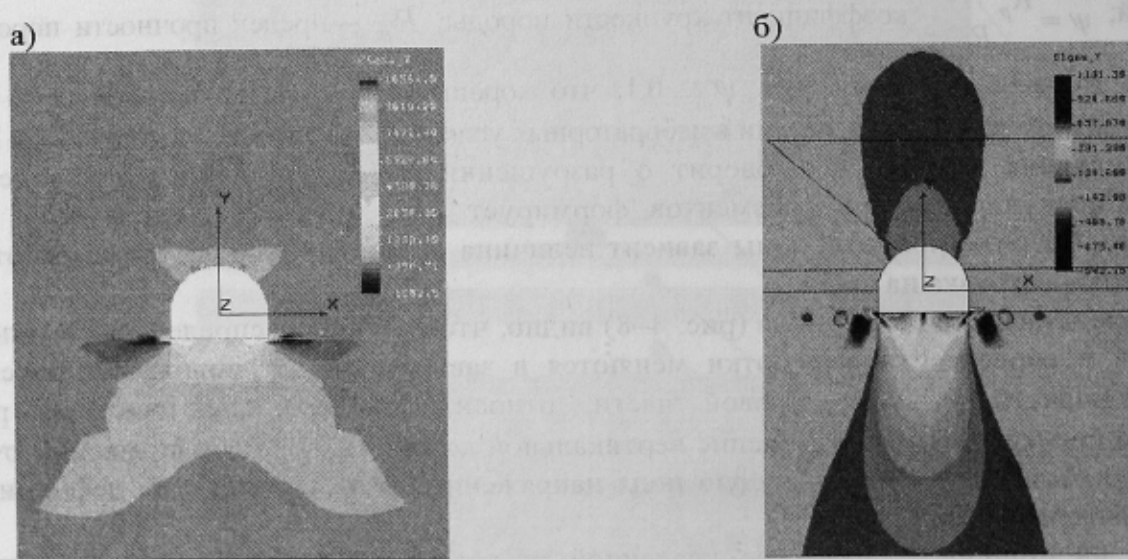


Рис. 6. Компоненты напряжений в модели породного массива в окрестности выработки на станции 3:  
а).  $\sigma_X$ ; б).  $\sigma_Y$ .

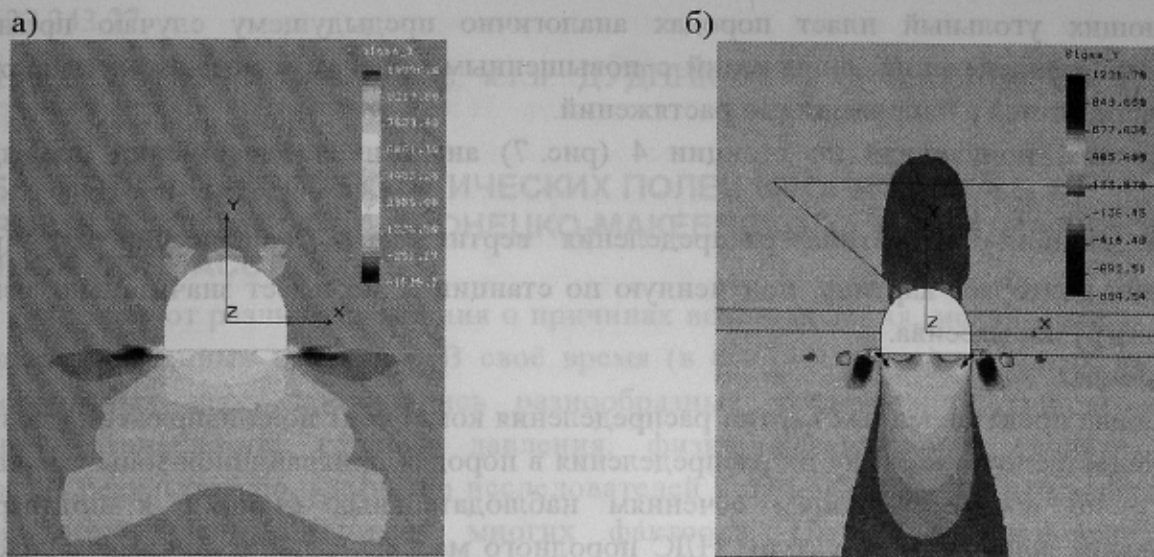


Рис. 7. Компоненты напряжений в модели породного массива в окрестности выработки на станции 4:  
а).  $\sigma_X$ ; б).  $\sigma_Y$ .

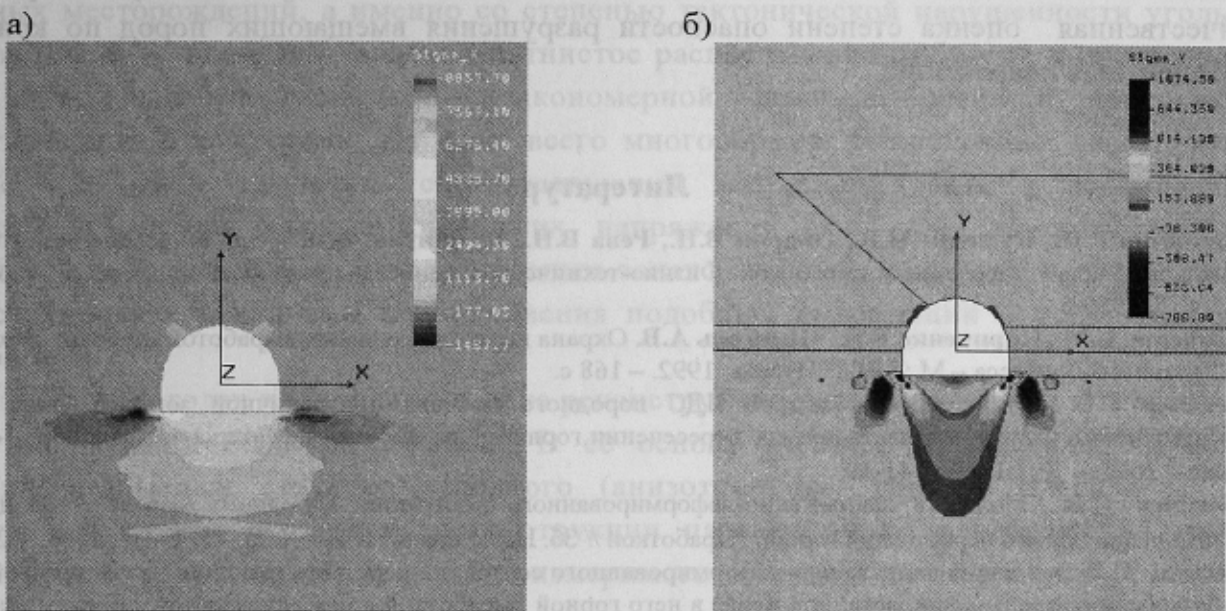


Рис. 8. Компоненты напряжений в модели породного массива в окрестности выработки на станции 5:  
а).  $\sigma_X$ ; б).  $\sigma_Y$ .

В сечении по станции 2 (рис. 5) максимальные растягивающие напряжения наблюдаются по углам выработки в породах почвы, что способствует разрыхлению пород и повышенному вдавливанию ножек крепи. В центре подошвы выработки сформировалась зона повышенных напряжений сжатия пород. В породах непосредственной почвы угольного пласта проявилась картина зональной структуры НДС массива, которая формируется вдоль контура выработки и выражающаяся в виде чередующихся, симметрично расположенных зон повышенных сжимающих и растягивающих напряжений. Породный массив в районе станции 2 имеет самый высокий уровень разгрузки.

На картине распределения вертикальной компоненты нормальных напряжений  $\sigma_Y$  на станции 3 (рис. 6) наблюдается увеличение зоны растягивающих напряжений в почве и появление большой зоны растяжений в породах кровли выработки. В районе ножек крепи и в центре почвы выработки наблюдаются максимальные напряжения растяжений. В

подстилающих угольный пласт породах аналогично предыдущему случаю проявилась зональность распределения напряжений с повышенным уровнем сжимающих напряжений, которые чередуются с напряжениями растяжений.

Картина, полученная по станции 4 (рис. 7) аналогичен качественно предыдущей станции 3.

На станции 5 картина распределения вертикальных напряжений  $\sigma_v$  (рис. 8) качественно повторяет картину, полученную по станции 2, но имеет значительно меньший уровень разгрузки массива.

#### Выводы.

Анализ представленных картин распределения компонент поля напряжений позволяет оценить качественную картину их распределения в породах приграничной зоны вмещающих выработку по соответствующим сечениям наблюдательных станций и подтверждает существование зональной структуры НДС породного массива с чередующимися участками пород с упругими и неупругими свойствами по мере удаления от границы очистных работ.

На основании полученных данных в результате проведенных исследований с привлечением численного метода конечных элементов в дальнейшем будет проведена количественная оценка степени опасности разрушения вмещающих пород по критерию эквивалентных напряжений.

#### Литература

1. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Опарин В.Н., Рева В.Н., Глушихин Ф.П. и др. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых № 4, 5, 6, 7, 1989 г
2. Усаченко Б.М., Кириченко В.Я., Шмиголь А.В. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса – М.: ЦНИЭИуголь, 1992. – 168 с.
3. Бегичев С.В. Эволюция параметров НДС породного массива приграничной зоны краевых частей, разрабатываемого угольного пласта при его пересечении горными выработками. Матеріали міжн. конф. «Форум гірників – 2006»– Д., НГУ.– С.41-48.
4. Бегичев С.В. Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего угольный целик при его пересечении горной выработкой // 36. Наук. праць НГУ. - №26.– Т. 1.– Д., 2006. – С. 28-37.
5. Бегичев С.В. Эволюция напряженно-деформированного состояния пород приграничной зоны краевой части, разрабатываемого угольного пласта, при входе в него горной выработкой из разгруженного массива. "Науковий вісник НГУ", №11, 2006.– С. 117-121.
6. Бегичев С.В. К вопросу о классификации зон НДС горного массива. Геотехнічна механіка: Між відзб.наук.праць ПТМ ім. М.С. Полякова НАН України – Дніпропетровськ, 2005. – вип. 59. С.115-119.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике.– М.: Недра, 1987.– 221 с.
8. Руководство КД 12.01.01.503– 2001. Руководящий нормативный документ Государственного департамента угольной промышленности Министерства топлива и энергетики Украины. "Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35". Издание официальное. Минтопэнерго Украины. Киев, 2002.
9. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики.– К.: Універ. вид-во «Пульсари», 2002.– 304с.
10. Шашенко А.Н., Майхерчик Т., Сдвижкова О.О. Геомеханические процессы в породных массивах.– Днепропетровск: НГУ, 2005.- 319 с.

© Бегичев С.В., Гапеев С.Н., 2007