

торов на ГПП при их установке или замене, указывая их реальную стоимость эксплуатации.

#### Список литературы

1. Самойлович И.С., Синчук О.Н., Панасенко Н.В., Ксендзов В.В. Электроэнергетика карьеров с циклично-поточной технологией. – К.: «АДЕФ-Украина», 2010. – 210 с.
2. Федоров А.А., Каменев В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с., ил.
3. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
4. Мелешко И.Ю., Френкель В.Ю., Кириллов В.М., Майзус С.И. ГОСТ 11677-85 «Трансформаторы силовые общие технические условия». - М., 1985. – 48 с.
5. Официальный сайт ГП «Енергоринок» // <http://www.er.gov.ua/>

Рукопись поступила в редакцию 06.03.12

УДК 622.831

Н.А. БУГАЕВА, аспирантка, Ю.М. СЕЛЕЗНЕВА, студентка,  
 Национальный технический университет, Донецк  
 И.В. НАЗИМКО, канд. техн. наук, УкрНИИМИ НАН Украины, Донецк

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ДЛИННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ. НАСТРОЙКА МОДЕЛИ

Проведена подготовка и настройка компьютерной модели для изучения распределения напряжений и деформаций пород вокруг лавы, показана достоверность результатов компьютерного моделирования.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Известно, что напряженно-деформированное состояние (НДС) массива значительно влияет на безопасность отработки запасов. Поэтому исследование этого состояния является актуальной научно-практической задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** В ходе исследований используются различные методы для прогноза такого влияния, среди которых наиболее показательным является моделирование НДС с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При этом параметры модели необходимо настроить так, чтобы расчетные показатели напряжений и деформаций соответствовали фактическим.

**Постановка задачи.** Целью работы является настройка модели для исследования НДС массива горных пород вокруг длинного очистного забоя для условий Донбасса.

**Изложение материала и результаты.** Для решения данной задачи были приняты средние горно-геологические и горнотехнические условия, которые для Донбасса характеризуются мощностью угольного пласта порядка 1,7 м, породами средней обрушаемости класса  $A_1, A_2$ . Породы представлены перемежающимися слоями алевролитов и песчаников средней прочности (40-70 МПа) с пологим залеганием. Управление кровлей осуществляется путем ее полного обрушения. Угольный пласт марки К отрабатывается по столбовой системе разработки, скорость продвижения лавы 100-150 м/мес. Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные условий подработки	
Параметры	Значение
Глубина разработки, м	210
Длина лавы, м	290
Мощность горизонтально залегающего пласта, м	1,7
Мощность наносов, м	60
Мощность слоев, м	10-15
Модуль упругости, ГПа	0,001-15
Коэффициент Пуассона	0,1-0,5
Угол внутреннего трения, град	10-50
Сцепление, МПа	0,001-15
Нагрузка, Па	2500
Объемный вес, МН/м <sup>3</sup>	0,025

Мощность пласта 1,7 м является приемлемой в связи с тем, что большинство шахт отрабатывают пласты с такой мощностью, используя механизированные комплексы. Данная мощность обеспечивает современную добычу 3-5 тыс. т/сут. при дегазации пласта скважинами с

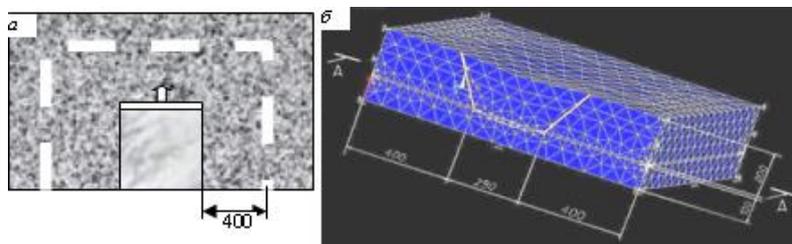
применением прямоточной и комбинированной схемы проветривания с подсыжением. Указанные темпы добычи при такой мощности требуют повышение длины лавы до 280-300м. При этом длина столба принимается не меньше двух длин лавы, так как процесс установившегося сдвижения начинает стабилизироваться после отхода лавы от разрезной печи на расстояние, большее длины лавы. Для таких условий мощности пласта и длины лавы принята глубина разработки 210 м. Именно при таком сочетании глубины разработки, длины лавы и длины ее отхода согласно «Правилам...» [1] наступает условие, близкое к условиям полной подработки земной поверхности, поскольку углы полных сдвижений соединяются практически на уровне земной поверхности. Такое состояние является наиболее выгодным для моделирования, так как оно обладает общностью (содержит черты как полной, так и неполной подработки земной поверхности). Следовательно, и результаты моделирования будут максимально информативными.

В связи с тем, что сходимость численных методов решения резко падает, если элементы малых размеров расположены рядом с крупными, высота зоны обрушенных пород принята равной 20 мощностей вынимаемого пласта. Это дает возможность учесть вынимаемую мощность пласта непрямым путем, поскольку мощность зоны беспорядочного обрушения составляет 6-8 вынимаемых мощностей угольного пласта. Известно, что в процессе обрушения порода разуплотняется и заполняет выработанное пространство. При вынимаемой мощности пласта 1,7 м высота зоны беспорядочного обрушения составит 10-14 м. В итоге физическая пустота выработанного пространства трансформируется в трещиноватую область пород, которая обладает повышенной податливостью.

Таким образом, выработанное пространство лавы можно моделировать путем снижения модуля деформации в пределах зоны беспорядочного обрушения. При этом установлено, что в зависимости от густоты трещин и величины их раскрытия модуль деформации обрушенной уплотненной толщи может уменьшаться на 70 % и более по сравнению с модулем деформации нетронутого массива.

На рис. 1 приведена модель массива с полученной в результате расчетов мульдой сдвижения. Поясним на этой схеме выбор граничных условий. Для расчета из массива выделен блок размерам 1000×790×310 м. Размеры блока обоснованы следующим образом: лава размещена от нижней грани модели на расстоянии 100 м, что вполне достаточно для того, чтобы нижняя граница расчетной области была дальше, чем граница зоны разгрузки. Боковые стенки модели должны быть расположены так, чтобы углы сдвижений от краевых частей выработанного пространства не выходили за пределы земной поверхности.

Рис. 1. Модель массива для расчета сдвижений земной поверхности: а - в плане; б - в трехмерном виде

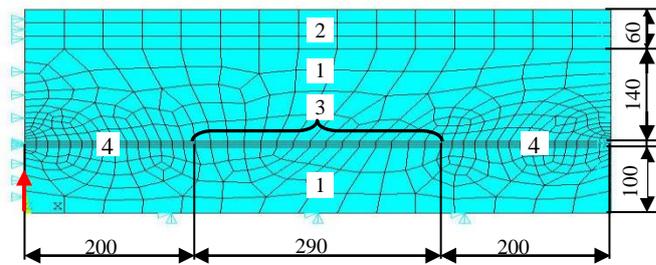


Специфика поставленной задачи заключается в том, что возникает необходимость учета свойств всей толщи, начиная с земной поверхности и заканчивая нижней границей расчетной области, которая совмещена с границей зоны разгрузки надра-

ботанной толщи.

При этом процесс сдвижения протекает под действием сил гравитации. В связи с этим для стохастического моделирования необходимо использовать весомую модель, что обеспечивается учетом объемного веса горных пород.

Для моделирования приняты следующие граничные условия: боковые стенки закреплены так, что перемещение возможно только в вертикальном направлении; нижняя граница (дно) модели закреплена жестко, верхняя граница свободна, что позволяет оседание модели под силами гравитации. Дальнейшие операции компьютерного моделирования выполнялись на плоской модели для упрощения решения поставленной задачи, представленной на рис. 2.



**Рис. 2.** Плоская модель массива горных пород для выполнения компьютерного моделирования: 1 - коренные породы; 2 - наносы; 3 - положение лавы; 4 - угольный пласт

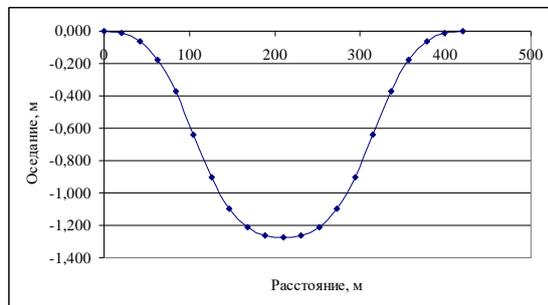
яющие отношение размеров выработки вкрест простирания ( $D_1=290$  м) и по простиранию ( $D_2=580$  м) к средней глубине работ.

Сдвигения земной поверхности в точках главных сечений мульды сдвигаения

$$\eta(x, y_1, y_2) = \eta_m S(zx, y_1, y_2)$$

где  $\eta$  - оседания земной поверхности;  $x, y_1, y_2$  - относятся соответственно к полумульдам по простиранию  $L_3$ , падению  $L_1$  и восстанию  $L_2$  пласта и указывают расстояние от начала полумульды (начала координат) до точки расчета деформаций;  $S(z)$  - функция, выражающая закономерность изменения величин соответствующих сдвигений в точках полумульды;  $Z_{x,y_1,y_2} = x, y_1, y_2 / L_{3,1, 2}$  - расстояние от начала полумульды (от начала координат) до точки расчета в долях длины полумульды соответственно по простиранию, падению и восстанию пласта.

По полученным данным построена мульда сдвигаения, приведенная на рис. 3.



**Рис. 3.** Мульда оседаний земной поверхности рассчитанная по «Правилам ...» [1]

При заданных исходных условиях существует большое число возможных сочетаний модуля упругости, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения для каждого из породных слоев, что существенно увеличивает сложность задачи настройки модели.

При этом только ограниченное число сочетаний указанных величин обеспечивает максимальное совпадение параметров мульды, полученной на модели и с помощью «Правил...».

Для нахождения этого сочетания использован метод планирования эксперимента на основе латинских квадратов [2].

Перед его использованием вычислено необходимое и достаточное количество экспериментов  $n$ , которое при относительной погрешности равной 0,05-0,1 и коэффициенте вариации 0,3 составило 8-32 при доверительной вероятности 95 %.

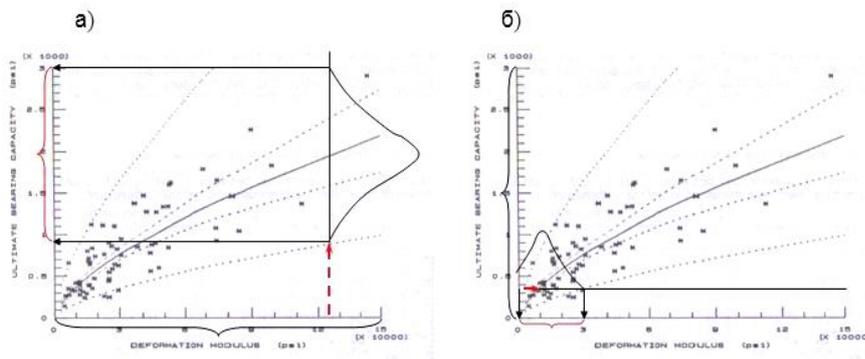
Геомеханическая система, имеющая несколько групп породных слоев и содержащая выемку, свободную поверхность и закрепленные границы, состоящая из материала с определенным пределом прочности и нелинейным поведением, вероятнее всего будет нелинейной. Для описания нелинейной зависимости необходимо 3-5 точек, что обеспечивает возможность обнаружения нескольких экстремумов.

В таком случае каждый исходный параметр будет принимать по пять значений, выбранные через определенный одинаковый интервал так, чтобы охватить весь диапазон изменения данного показателя (фактора). В табл. 2 приведены факторы на пяти уровнях, которые будут изменяться при выполнении стохастического моделирования.

Таблица 2

Уровень	Факторы и уровни исходных данных															
	Факторы и их значения															
	$E_1$ , ГПа	$C_1$ , МПа	$\mu_1$	$\varphi_1$ , °	$E_2$ , ГПа	$C_2$ , МПа	$\mu_2$	$\varphi_2$ , °	$E_3$ , ГПа	$C_3$ , МПа	$\mu_3$	$\varphi_3$ , °	$E_4$ , ГПа	$C_4$ , МПа	$\mu_4$	$\varphi_4$ , °
1	0,100	0,500	0,1	10	10,00	3	0,1	10	0,001	0,001	0,1	10	1,00	1,00	0,1	10
2	0,125	0,525	0,2	20	11,25	6	0,2	20	0,025	0,125	0,2	20	1,25	1,25	0,2	20
3	0,150	0,550	0,3	30	12,50	9	0,3	30	0,050	0,250	0,3	30	1,50	1,50	0,3	30
4	0,175	0,575	0,4	40	13,75	12	0,4	40	0,075	0,375	0,4	40	1,75	1,75	0,4	40
5	0,200	0,600	0,5	50	15,00	15	0,5	50	0,100	0,500	0,5	50	2,00	2,00	0,5	50

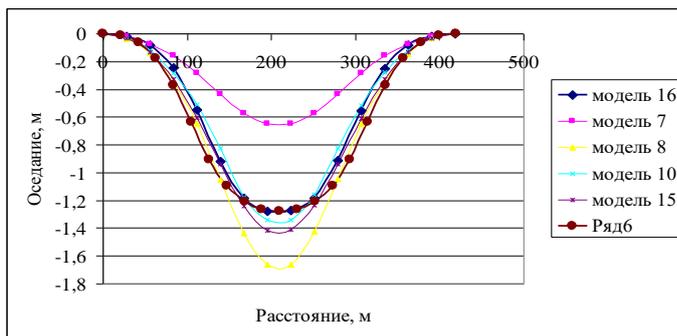
На рис. 4 приведено соотношение для сцепления и модуля упругости пород, из которого следует, что при большем сцеплении больше модуль упругости и наоборот. Это позволило модифицировать методику проведения экспериментов, используя парную корреляцию, что сократило количество опытов до 25.



**Рис. 4.** Корректировка плана эксперимента на корреляцию сцепления и модуля деформации: *а* - первые 13 экспериментов; *б* - вторые 12 экспериментов

В ходе моделирования для каждой из 25 моделей получены значения координат узлов элементов и вертикальных деформаций в

этих узлах, на базе чего построены мульды оседаний земной поверхности при разных сочетаниях физико-механических свойств в массиве горных пород, представленные на рис. 5.



**Рис. 5.** Мутьды сдвижений, построенные для нескольких разных моделей по предложенной методике и по «Правилам охраны...»

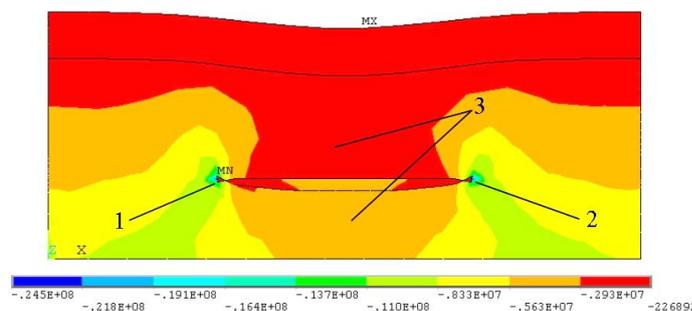
Сопоставление муьды сдвижений, построенной по «Правилам...», с муьдой, полученной для модели №16, показывает, что разница не превышает 11 % (см. рис. 5). Это позволяет в дальнейшем использовать данную модель в качестве основы для стохастического моделирования.

вания.

Длина муьды равняется 420 м, максимальные оседания наблюдаются над центром лавы и достигают значения 1,275 м.

Вертикальная компонента геостатического горного давления является одним из факторов, доказывающим достоверность используемой модели. В данном случае эта компонента для точки на глубине 210 м при  $X = 133$  м равна 5,43 МПа, при расчете по классической формуле  $\gamma H$  составляет 5,25 МПа. Разница между этими значениями не превышает 4 %.

На рис. 6 представлено распределение вертикальной компоненты ( $S_Y$ ) в массиве горных пород. Видно, что зоны максимального напряжения 1 и 2 сформировались у краевых частей выработанного пространства лавы и в пределах зоны опорного давления и составляют около 19 МПа, что в 3,8 раза выше геостатического уровня. Это хорошо согласуется с установленной закономерностью формирования зоны опорного давления вокруг выработанного пространства. Зоны разгрузки 3 приурочены к середине выработанного пространства. При этом разгрузка в почве меньше и быстро затухает по мере удаления вниз от почвы отработанного пласта.



**Рис. 6.** Напряжения по вертикальной компоненте в массиве для модели №16

В кровле наоборот, разгруженная от горного давления область распространяется на всю высоту массива. В целом такие закономерности распределения вертикальной компоненты вокруг выработанного пространства лавы хорошо согласуются с известными параметрами распределения напряжения, что

свидетельствует о достоверности полученных результатов компьютерного моделирования.

Известно, что при величине вынимаемой мощности более 0,7 м сдвигение подрабатываемой поверхности протекает в запредельном состоянии, в результате которого возникают зоны разрушения.

Поэтому для подтверждения достоверности данной модели было построено распределение эквивалентных пластических деформаций в вертикальной плоскости, показанное на рис. 7.

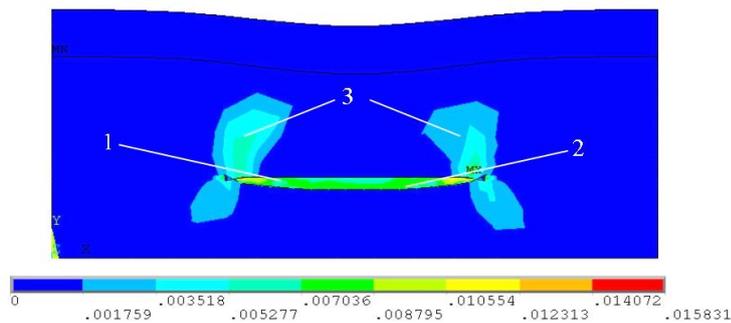


Рис. 7. Распределение эквивалентных пластических деформаций для модели №16

Из данных рис. 7 следует, что зоны максимальных разрушений 3 приурочены к краевым частям выработанного пространства и наклонены в его сторону примерно на  $70^\circ$ . Это хорошо согласуется с известной схемой сдвижений, которая трактует указанные области как зоны мак-

симальных изгибов с возможным расслоением [3]. Максимальные необратимые деформации достигают величины 0,015, что в 2-3 раза больше предельных деформаций, при которых наступает разрушение породы. Кроме того, разрушения наблюдаются в зоне беспорядочного обрушения пород 1, и в зоне поднятий пород почвы очистной выработки 2. Это соответствует общепринятым положениям схемы сдвижения.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Таким образом, настройка модели, проведенные исследования и полученные результаты свидетельствуют о достоверности компьютерного моделирования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на выполнение операций стохастического моделирования.

#### Список литературы

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. - М.: Недра, 1981. - 288 с.
2. Маркшейдерское дело: Учебник для вузов / Д.Н. Оглоблин, Г.И. Герасименко, А.Г. Акимов и др. - 3-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, - 1981. - 704с.
3. Музафаров Ф.И. Исследование общих закономерностей процесса сдвижения толщи горных пород и земной поверхности методом объемных моделей для условий разработки пологих пластов Донбасса: Дисс...канд. техн. наук: 05.15.02 / ДПИ. - Донецк, 1965. - 32 с.

Рукопись поступила в редакцию 29.05.12

УДК 621-192

М.В. КИЯНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., А.В.ГУЦАЛ, аспірант  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

### ДІАГНОСТИКА ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ ТА РЕСУРСУ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ

У статті розглядаються основні діагностичні ознаки, які виникають при раптових відмовах пар тертя роторних механізмів та методи розпізнавання технічного стану контактуючих поверхонь, розроблено технологію діагностування процесу розвитку та утворення локальних дефектів поверхонь тертя.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Робота сил тертя на поверхнях тертя, в першу чергу, залежить від коефіцієнту тертя і факторів, що визначають рівень сил тертя. З одного боку, зниження витрат на подолання сил тертя визначається досконалістю роторних механізмів і машин, що застосовуються у технічних системах, з іншого - постійною увагою персоналу експлуатації до запобігання впливу факторів, що можуть змінити вид і режими тертя і зношування працюючого механізму незалежно від його досконалості. Наведені факти показують, що подолання сил тертя і втрата ресурсу поверхонь тертя мають свої об'єктивні закономірності, але механізм цих витрат повинен стати зрозумілим і підлягати свідомому керуванню в експлуатації.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Основним деградаційним явищем, що приводить до раптових відмов пар тертя в механічних передачах чи механізмах є розвиток локальних дефектів контактуючих поверхонь типу вищерблення або задиру. Існує дві групи методів діагностики названих дефектів [1,2]: 1 - орієнтується на вилучення діагностичної інформації з складових сигналів в зонах основних частот вимушених коливань; 2 - група орієнтується на інформацію в зонах власних частот механізму (вимірювальної системи). Обидва підходи базуються на тому факті, що виникнення і розвиток пошкоджень контактуючих поверхонь за часом напрацювання