

УДК 622.831

**Е.В. Бабенко** (канд. техн. наук),**И.В. Назимко** (канд. техн. наук)

Украинский государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела, г. Донецк

[iv00@mail.ru](mailto:iv00@mail.ru)

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЗОНЫ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ ВО ВРЕМЕНИ

Установлена новая закономерность сдвижений земной поверхности, которая состоит в опережающем разрушении земной поверхности и наносов до того, как приблизится фронт разрушений со стороны выработанного пространства, а также скачкообразное слияние этих зон на завершающей стадии сдвижений подработанного массива.

**Ключевые слова:** сдвижение массива горных пород, динамика.

**Введение.** Отработка месторождений полезных ископаемых сопровождается развитием разрушений в подработанном массиве горных пород. Процесс развития разрушений является достаточно сложным и на сегодняшний день изучен не полностью. Достаточно детально установлены параметры зон сдвижений над длинными очистными забоями при разработке угольных месторождений [1-3], камерами, отрабатываемыми с выпуском руды. Основные параметры зон сдвижений подработанной толщи достаточно хорошо изучены в статике, когда процесс сдвижений в основном завершился, а подработанная толща пришла в равновесие.

Развитие зон сдвижений на динамической стадии деформирования подработанной толщи исследовано меньше. Главное внимание в работах, посвященных динамическим сдвижениям подрабатываемого массива уделено с точки зрения изучения параметров мульды сдвижений на земной поверхности [4-6]. При этом исследованы в основном геометрические параметры мульды. Вместе с тем параметры зоны сдвижений в подработанной толще являются следствием процессов деформирования и разрушения вмещающих пород. Поэтому изучение указанных процессов дает возможность понять первопричину всех сдвижений и

позволяет более достоверно установить зависящие от геомеханических процессов параметры.

Динамику сдвижений подработанной толщи последнее время исследуют в основном с помощью мониторинга сейсмических событий техногенной природы, которые наведены очистными работами быстро движущихся очистных забоев [7-9]. Указанным методом получены новые важные закономерности динамики процесса обрушения кровли, которые подтвердили ранее установленные закономерности периодического зависания и обрушения основной кровли позади движущегося очистного забоя и уточнили параметры сдвижений впереди лавы. Доказано, что процесс разрушения кровли пласта может возникать далеко впереди движущейся лавы.

Несмотря на особую ценность полученных результатов, остается ряд неисследованных сторон сложного процесса сдвижения подработанной толщи относительно пространственно-временного перераспределения запредельных зон. Дело в том, что снять экспериментально огромный массив данных во времени и пространстве пока довольно сложно и главное дорого. В связи с этим эффективным инструментом исследования процессов развития зон сдвижений в трехмерном пространстве и времени остается численное моделирование, которое использовалось в данной работе.

**Выбор модели и метода моделирования.** Для моделирования процесса сдвижений подработанной толщи горных пород использовался метод конечных разностей, который обладает известными преимуществами перед другими численными методами, так как органично учитывает три координаты трехмерного пространства и время как равноправные аргументы, по которым вычисляются производные при решении системы дифференциальных уравнений, которые описывают динамику сдвижений в форме второго закона Ньютона и зависимостей между напряжениями и деформациями, а также предельное состояние горной породы. [9-11].

Основные дифференциальные уравнения движения массива горных пород записываются в следующем виде

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt}$$

где  $\sigma_{i,j}$  – нормальные и касательные напряжения, действующие в массиве горных пород, Па;

$x_i$  - координаты декартовой системы, м;

$\rho$  – плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;

$b_i$  – удельные силы, развивающиеся в массиве горных пород, и приводимые к единице его массы Н/кг;

$v_i$  - скорость движения элементарных объемов массива горных пород, м/сек;

$t$  - время, сек.

Если правая часть равна нулю (с точностью до погрешности численных вычислений), наступает статическое равновесие массива горных пород. В противном случае породы находятся в состоянии активных сдвижений, что сопровождается конечной скоростью смещений на контуре выработки и в выработанном пространстве. Как показали инструментальные наблюдения, величина скорости изменяется в пределах от 3 мм/сут до 72 мм/сут.

Система дифференциальных уравнений решается численным методом конечных разностей. При решении системы дифференциальных уравнений используется современная модель прочности горных пород, основанная на теории Кулона-Мора. При этом учитывается процесс дилатансии пород после разрушения и зависимость величины разуплотнения от среднего уровня сжатия. Это дает возможность реалистично моделировать процесс нелинейного деформирования вмещающих пород, включая участок запредельного деформирования и разуплотнение породы.

В качестве модели для расчета динамики процесса сдвижений подработанной толщи использовался участок массива горных пород, подрабатываемый одиночной лавой.

Решение выполнялось для горизонтального залегания пласта, что позволило уменьшить размеры расчетной области и ко-

личество зон, на которые она разбита. При этом использована половина расчетной области с учетом симметрии задачи относительно линии подвигания лавы (рис. 1). Направление движения лавы показано стрелкой. Контуры расчетной области показаны штрихпунктирной линией. Условно линию подвигания очистного забоя считаем совпадающей с линией простирания пласта, а линию очистного забоя совпадающей с линией падения.

На рис. 2 показана расчетная область в трехмерном изображении. Длина лавы принята равной 240 м. Лава совершает пять подвиганий по 40 м. Каждое подвигание осуществляется за 6 суток. Это означает, что моделировалась скорость подвигания лавы, равная 200 м/мес. Приращение подвигания лавы, равное

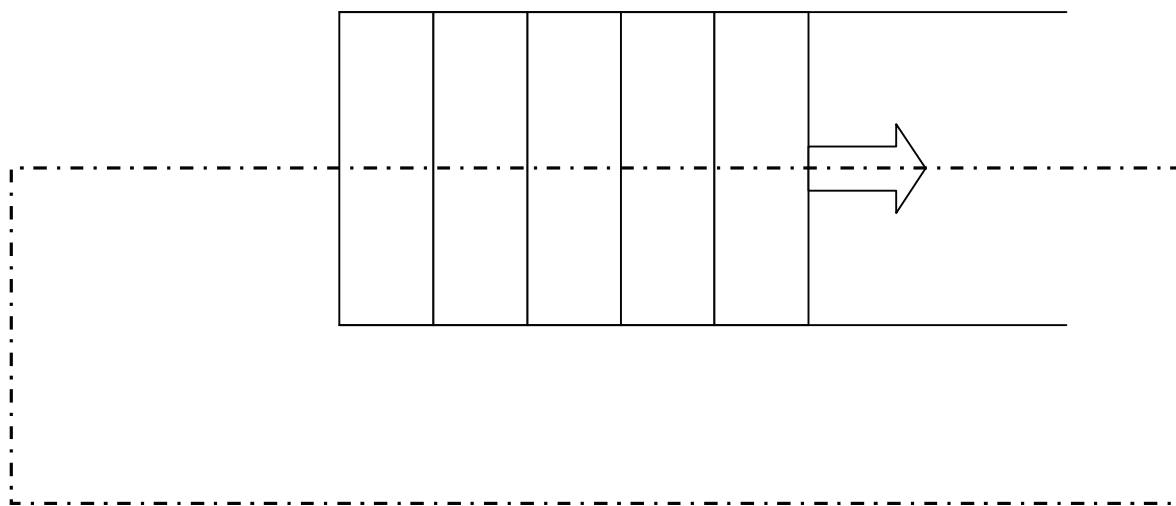


Рис. 1. План горных выработок

40 м согласуется с шагом обрушения основной кровли, что позволяет уловить этот важный процесс сдвижений. Управление кровлей осуществлялось путем ее полного обрушения.

Вынимаемая мощность угольного пласта составляла 2,0-2,3 м. Границы расчетной области выбирались на расстоянии от выработанного пространства действующей лавы с учетом того, чтобы на земной поверхности размещалась вся мульда сдвижений (точнее ее правая по ходу лавы половина). Эти условия проверялись по углам сдвижений (см. штрихпунктирные линии на рис. 2). Расстояние от монтажной камеры до передней границы расчетной области составляет 200 м, от конвейерного штрека до бо-

ковой границы 120 м (длина лавы равна 240 м). Такие расстояния с запасом превышают размеры зон опорного давления, которые на глубине залегания пласта, равной 480 м не превышают 50 м. Расстояние от почвы отрабатываемого пласта до нижней границы расчетной области принято равным 200 м, что превышает глубину зоны разгрузки. Таким образом, выбранные размеры области полных сдвижений удовлетворяют охват всех характерных зон влияния лавы на массив горных пород и земную поверхность.

Пласт залегает в осадочных породах песчано-глинистого состава, характерного для Донецко-Макеевского или Красноармейского угледобывающих районов. В таблице 1 приведены физико-механические свойства пород с учетом их прочности и предельного деформирования.

Ось X ориентирована вдоль линии падения, Y – совпадает с направлением простирания и движения лавы, ось Z ориентирована против направления силы тяжести.

На рис. 3 показана сетка разбивки расчетной области на зоны для численного решения дифференциального уравнения.

Таблица 1

Деформационные и прочностные свойства вмещающих пород

Группа пород	Модуль упругости, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Угол дилатансии, град
Почва	15,33	10,2	30	5	2	8
Угольный пласт	5,6	3,9	34	0,3	1	8
Породы в кровле	8,7	6,0	28	2	1,5	5
Наносы	0,5	0,34	18	0,2	0,4	4

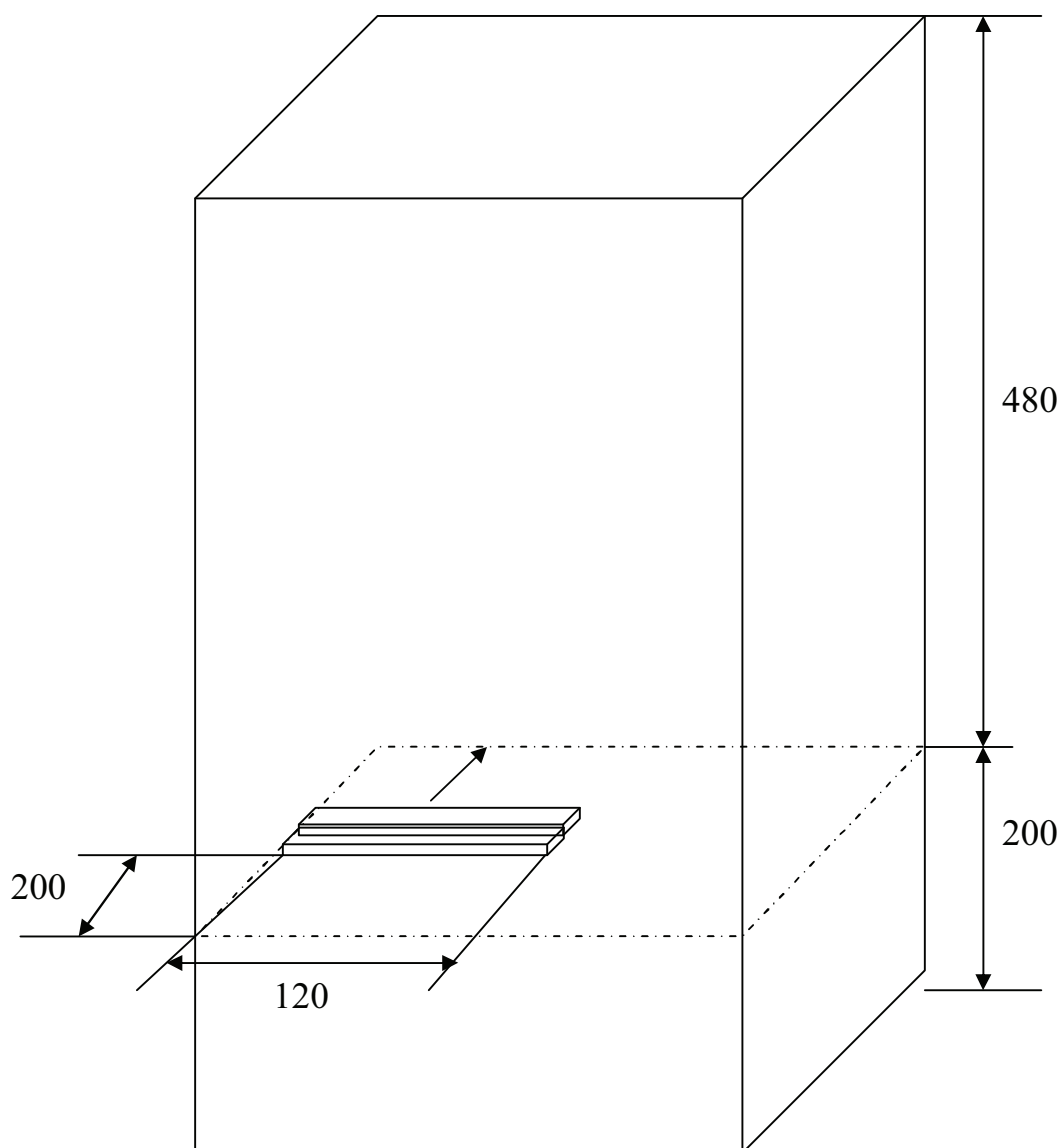


Рис. 2. Вид расчетной области в аксонометрии

В области ожидаемых максимальных градиентов напряжений и деформаций массива горных пород выполнены сгущения сетки для обеспечения одинаковой точности расчетов. Стрелкой показано направление движения лавы. Вся расчетная область разбита на 6340 разностных зон. Такая степень разбивки определена как рациональная с учетом двух противоположных целей: обеспечения удовлетворительной точности решения и необходимости многократного повторения решения для моделирования подвигания очистного забоя. Следует иметь в виду, что на каждом подвигании очистного забоя задача решается с учетом текущего напряженного состояния как начального каждый раз заново.



С учетом того, что необходимо моделировать процессы разрушения пород и их необратимых сдвижений, затрачивается десятки

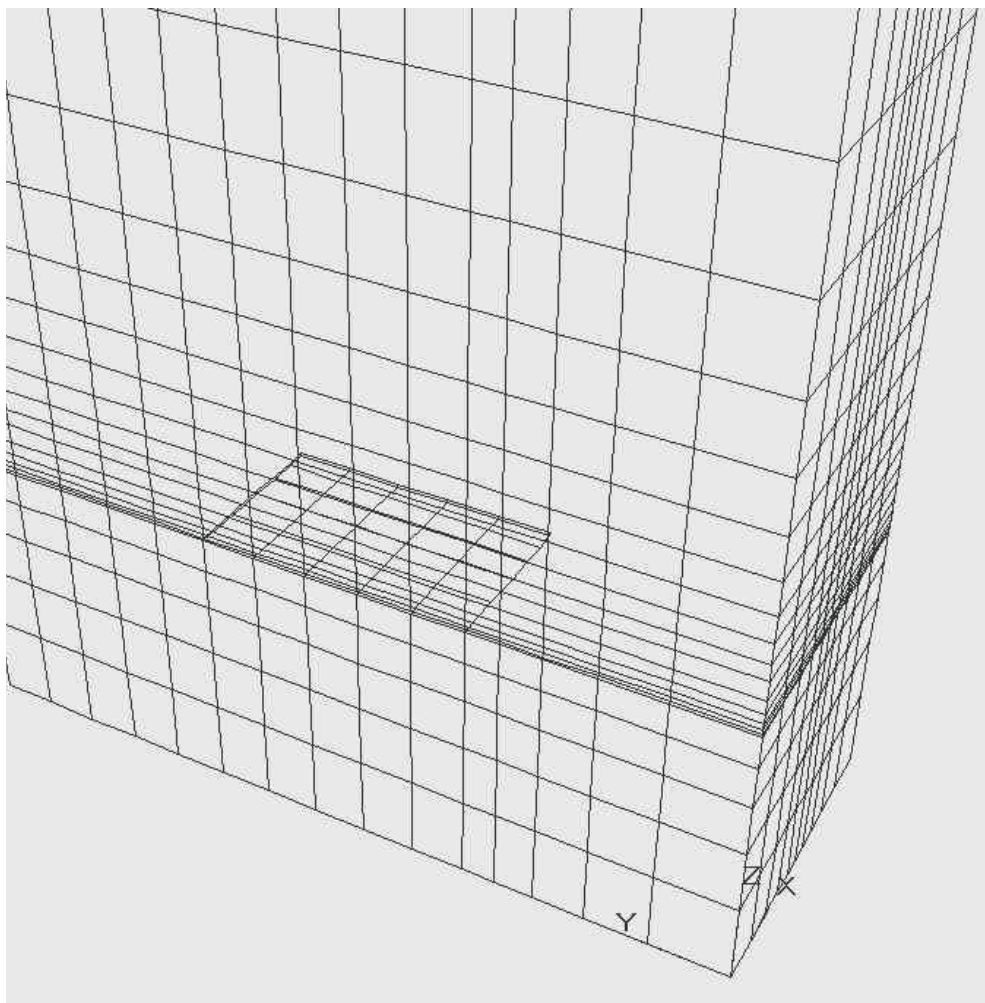


Рис. 3. Фрагмент расчетной области с недельным подвиганием лавы

тысяч циклов, а для общего решения задачи необходимо выполнить сотни тысяч циклов пересчета напряжений и деформаций.

Для нахождения областей предельного состояния необходимы дополнительно значения пределов прочности на одноосное сжатие. Для пород почвы, пласта, кровли и наносов соответствующие пределы приняты равными 50, 15, 40 и 10 МПа.

Граничные условия, принятые при математическом моделировании приведены на рис. 4. Массив пригружен собственным весом, на боковых гранях расчетной области запрещены перемещения по нормали к соответствующим граням, а точки дна расчетной области закреплены в вдоль силы тяжести. На плоскости

симметрии запрещены кроме этого угловые деформации модели относительно оси  $Y$ .

Проверка достоверности модели и метода решения задачи выполнена ранее и описана отдельно одним из соавторов данной статьи [13].

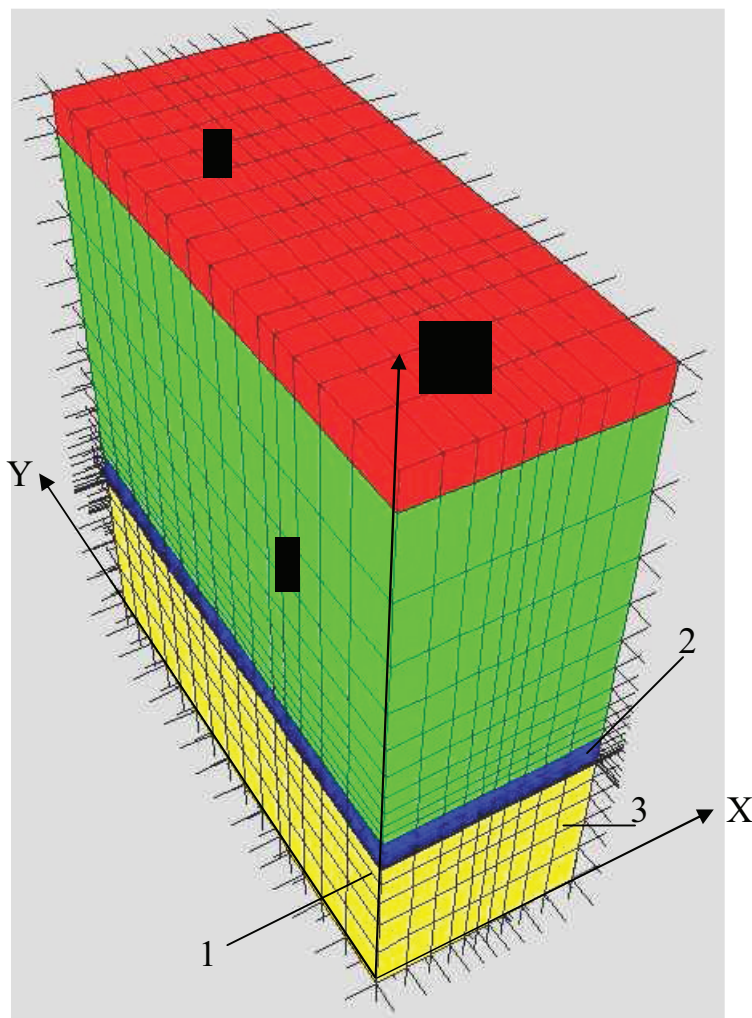


Рис. 4. Расчетная схема

**Анализ результатов моделирования.** По мере отхода лавы от монтажной камеры в процесс сдвижений вовлекаются слои, расположенные выше от непосредственной кровли отработываемого пласта.

На рис. 5 показано состояние области запредельного состояния в окрестности выработанного пространства лавы на завершающей стадии процесса активных сдвижений подработанной толщи. В непосредственной почве отработанного пласта



фиксируется зона разрушенных пород 1. Породы перешли в за-предельное состояние под действием сдвига с растяжением, действовавших со стороны монтажной камеры и растяжения со стороны движущейся лавы. Отметим, что в запредельное состояние переходит только тонкий слой почвы толщиной 5-10 м. Нижележащие породы почвы деформируются упруго, что совпадает с известными представлениями об упругом восстановлении пород наработанного массива.

Над центром выработанного пространства на высоту до основной кровли породы разрушаются под действием сдвига, который происходит в настоящий момент и сдвига и растяжения, которые произошли ранее. Большая часть подработанной толщи как в пределах выработанного пространства, так и над краевыми частями пласта разрушаются в результате действия касательных напряжений. Это естественно, поскольку указанные области переходят по мере движения лавы через зоны максимальных касательных напряжений.

В верхней части зоны полных сдвижений массив разрушается от комбинированного действия сдвига и растяжений, произошедших в прошлом. Растяжения обусловлены оседанием подработанной толщи и ее отрывом от вышележащего массива.

Между подработанным массивом и наносами имеется устойчивая область пород, которая сохранила целостность. Это важная закономерность, поскольку она свидетельствует о том, что процесс перехода пород подработанной толщи в запредельное состояние не распространяется непрерывно, а развивается в отдельных областях, между которыми может временно оставаться ненарушенный участок массива. В такой ненарушенной области действует повышенный уровень горизонтального сжатия, которое и содействовало сохранению допредельного состояния. Земная поверхность в пределах мульды сдвижений разрушена в основном от действия сдвига. Эти предельные сдвиги регистрируются на земной поверхности в виде наклонов, кривизны и скашивания. На двух локальных участках, расположенных над краевыми частями выработанного пространства разрушения произошли от растяжения. Это закономерно, поскольку именно в

этих местах согласно существующим представлениям о схеме сдвижений должны происходить максимальные растяжения земной поверхности в горизонтальном направлении.

Рис. 6 показывает области активизации только с наружной стороны модели. Вместе с тем представляет значительный интерес изучение динамики развития процесса сдвижений. В связи с этим на следующих рисунках показаны состояния областей, перешедших в активную стадию сдвижений на различных стадиях. Так на рисунке 6 показано начало активизации ранее обрушенной толщи. Как известно, эта высота равна 6-8 кратной мощности отработанного пласта.

Видно, что при этом в активизацию сдвижений толщи вовлекается слой обрушенных пород. При этом начинается активизация со стороны почвы отработанного пласта и расширяется в плоскости его выработанного пространства. Именно в этом месте коэффициент разуплотнения имеет наибольшую величину, равную 1,15-1,2.

По мере развития области запредельного состояния в активизацию сдвижений вовлекаются породы в зоне шарнирно-блоковых перемещений. На рис. 7 показано два вида области активизации сдвижений, специально для того, чтобы показать, что опережающий рост активизации сдвижений вверх в направлении к земной поверхности наблюдается по кромке фронта области активизации. Это хорошо согласуется со схемой сдвижений толщи над длинным очистным забоем. Именно в этой области возникают зоны максимальных изгибов слое с возможным расслоением и образованием разрывов сплошности.

На рис. 8 видно, что область активизации сдвижений начинает формироваться на земной поверхности задолго до того, как фронт активизации сдвижений подошел снизу, со стороны выработанного пространства. Это явление зарегистрировано впервые и заслуживает особого внимания и отдельного изучения.

На рис. 9 видно, что зона активизации сдвижений земной поверхности формируется в первую очередь по границе мульды сдвижений. Это закономерно, поскольку именно на этих участках имеет место максимальное растяжение, изгиб и скашивание на-

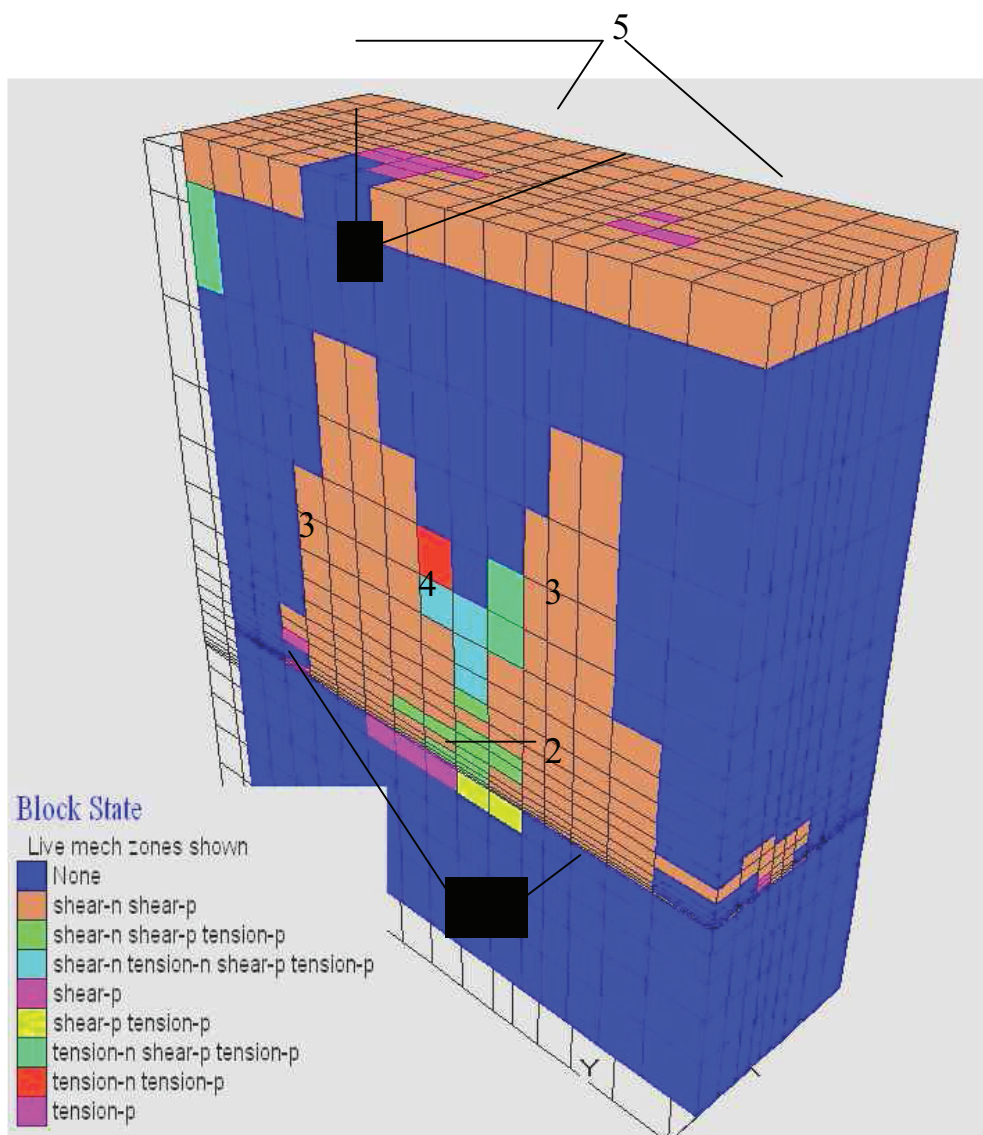


Рис. 5. Характер разрушения толщи и земной поверхности при отходе лавы на 160 м

носов и земной поверхности. Таким образом, опережение фронта активизации сдвижений подработанной толщи по границе мульды сдвижений объясняется тем, что именно в пределах этой подобласти породы и наносы находятся в состоянии, наиболее близком к предельному.

На завершающей стадии сдвижений области запредельного состояния в области наносов и со стороны отработанного пространства объединяются скачкообразным встречным движением. Одновременно происходит развитие разрушений в области наносов по всей площади мульды сдвижений (рис. 10).

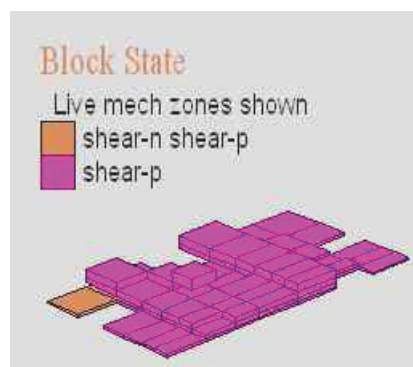


Рис. 6. Начало процесса активизации толщи

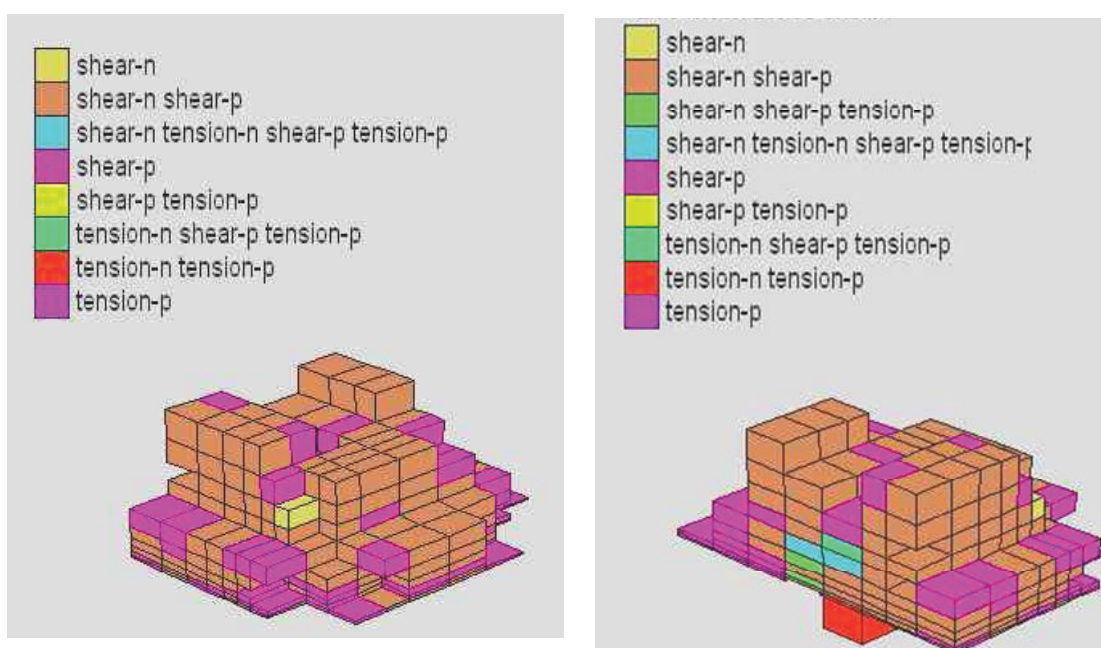


Рис. 7. Развитие процесса активизации толщи в зоне шарнирно-блоковых оседаний

Характерно, что в подавляющем объеме области активизации сдвижений переход пород в запредельное состояние наблюдается главным образом из-за предельных касательных напряжений.

Это означает, что процесс сдвижений подработанной толщи протекает неравномерно, причем его темпы увеличиваются при приближении зоны разрушений к земной поверхности за счет скачкообразного встречного движения областей запредельного



состояния со стороны наносов и со стороны выработанного пространства.

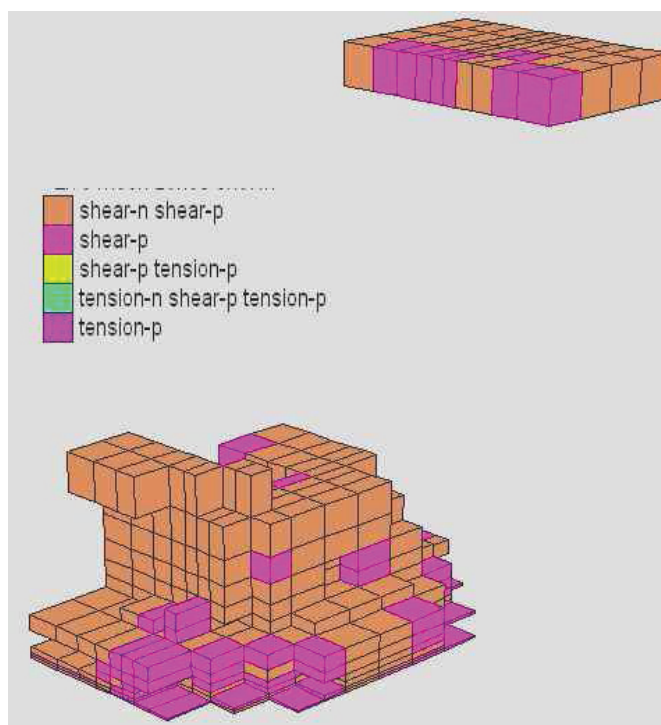


Рис. 8. Выход активизации на земную поверхность

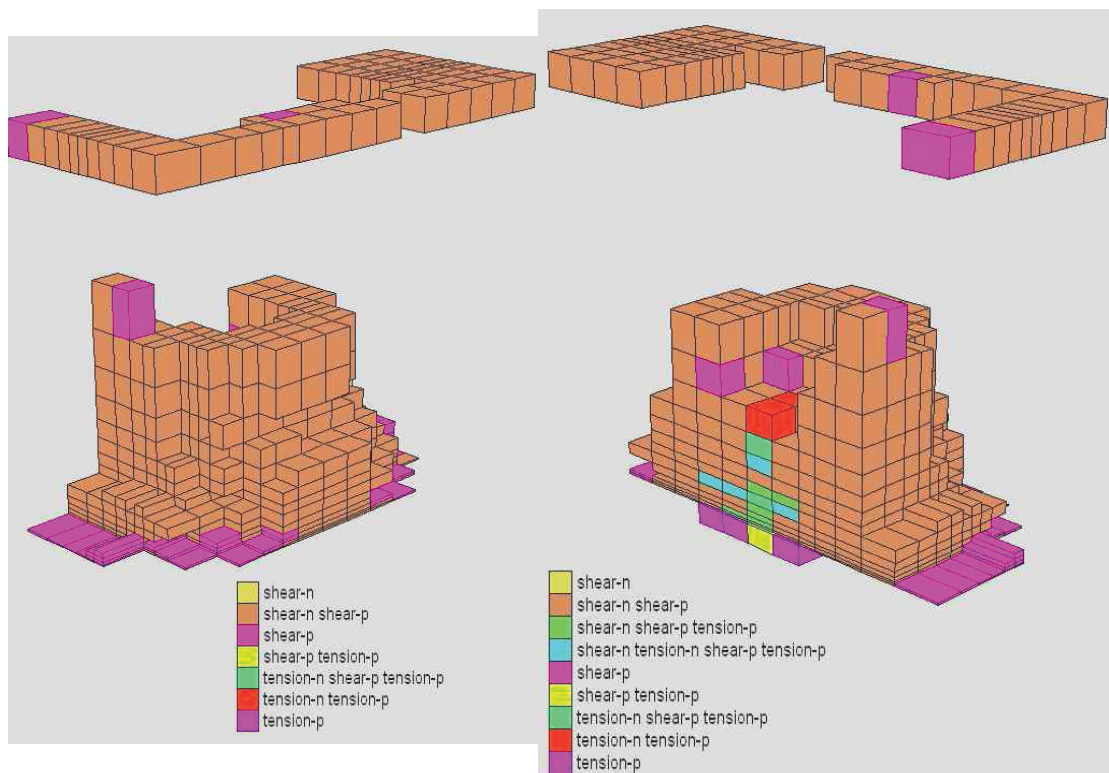


Рис. 9. Развитие области запредельного состояния в наносах

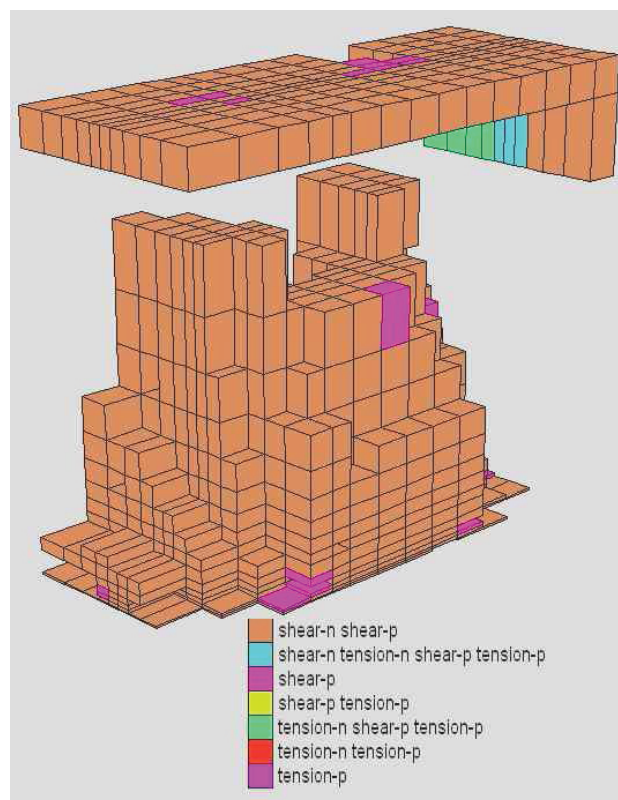


Рис. 10. Активизация сдвижений подработанного массива на стадии затухания

Таким образом, установлена многостадийность развития области активизации сдвижений подработанной толщи горных пород, и неравномерность роста в трехмерном пространстве. Это определяется комплексом сложных геомеханических процессов, параметрами характерных зон области сдвижений, а также предельным состоянием.

Установленная закономерность опережающего разрушения наносов вблизи земной поверхности до того, как снизу подошел фронт разрушений в подработанной толще коренных пород и скачкообразное слияние этих зон на завершающей стадии сдвижений нуждается в экспериментальном подтверждении. Решение этой задачи является предметом дальнейших исследований.

#### Список литературы

1. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом: отраслевой стандарт. – К.: Мінпаливенерго України, 2004. – 127 с.



2. Doney E.D. Subsidence Prediction in Illinois Coal Basin / Doney E.D., Peng S.S. and Luo Y. // 10th International Conference on Ground Control in Mining. – P. 212-219.
3. Bialek J. Influence of working direction shape of subsidence trough in view of geodesic observation and numerical modeling / Bialek J. and Mielimaka R. // ISM 12th International Congress. – P. 32-37.
4. Петрук Е.Г. Исследование деформаций земной поверхности в мульде сдвижения по времени / Е.Г. Петрук // Изв. вузов. Горный журнал. – 1969. – № 1. – С. 40-43.
5. Назаренко В.О. Закономерности расположения максимальных оседаний земной поверхности в мульде сдвижения / В.О. Назаренко, Н.В. Йощенко, Е.В. Стельмашук // Науковий вісник НГУ – 2006. – №10. – С. 8-12.
6. Стельмашук Е.В. Пространственно-временное моделирование мульды сдвижения при ее формировании / Е.В. Стельмашук, В.А. Назаренко // Геотехнічна механіка: межвід. зб. наук. праць; Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – 2007. – Вип. 72. – С. 25-31.
7. Chavan A.S. Prediction of area instability from mining induced seismicity / A.S. Chavan, N.M. Raju // Rock mechanics Proceedings of the 35<sup>th</sup> U.S. Symposium. – Rotterdam: A.A. Balkema Publisher, 1995. – P. 533-538.
8. Van Aswegen G. Towards best practice for routine seismic hazard assessment in mines / Van Aswegen G. // 30<sup>th</sup> International Conference of Safety in Mines Research Institutes, South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2003. – P. 121-138.
9. Dubinski J. Influence of the mining tremor source radiation directivity on the distribution of the seismic interactions with surface / Dubinski J., Lurka A., Stec K. // 20<sup>th</sup> world mining Congress. – Tehran, 2005. – P. 889-894.
10. Cundall P. A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems, in Numerical Methods in Geomechanics / Cundall P. and M. Board // Proceedings of the 6th International Conference, Innsbruck, Austria, April 1988. – G. Swoboda; Ed. Rotterdam: Balkema, 1988. – P. 2101-2108.
11. Abazovic E. A Practice Oriented Modified Linear Elastic Constitutive Model for Fire Loads and Its Application in Tunnel Construction," in Numerical Modeling in Geomechanics / Abazovic E. and A. Amon // Proceedings of the 3rd International Symposium, Sudbury, Ontario, Canada, October 2003. – Eds. Lisse: Balkema, 2003. – P. 313-319.
12. Cundall P.A. A discrete numerical model for granular assemblies / Cundall P.A. Strack O.D.L. // Geotechnique, 29. – №1. – P. 47-65.
13. Бабенко Е.В. Настройка модели для моделирования сейсмических событий техногенной природы / Е.В. Бабенко // Проблеми гірського тиску. – 2009. – Вип. 17. – С. 66-93.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2012.  
Рекомендовано до друку д-ром техн.наук В.Г. Ільюшенко

### **О.В. Бабенко, І.В. Назимко**

Український державний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи, м. Донецьк

#### **ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ЗОНИ ПОЗАМЕЖНОГО СТАНУ ПІДРОБЛЕНОЇ ТОВЩІ У ЧАСІ**

Встановлено нову закономірність зрушень земної поверхні, що полягає у випереджальному руйнуванні земної поверхні та наносів до того, як наблизився фронт руйнування з боку виробленого простору, а також стрибкоподібне злиття цих зон на завершальній стадії зрушень підробленого масиву.

**Ключові слова:** зрушення масиву гірських порід, динаміка.

### **Ye.V. Babenko, I.V. Nazimko**

Ukrainian State Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics and Mine Surveying, Donetsk

#### **PECULIARITIES OF TEMPORAL DEVELOPMENT OF UNDERWORKED ROCK MASS MARGINAL STATE ZONES**

We investigated the behavior of a rock mass undermined by a longwall face. Fast Lagrangian procedure was used to simulate the process of ground subsidence and destruction. Zones involved in the destruction process were identified and 3D-plotted. Computer simulation demonstrated that the process of surface destruction begins before the moment when the undermined rock mass has completely passed into inelastic state.

**Keywords:** rock mass displacement, dynamics, longwall mining.