

PACS: 61.43.Nv, 61.72.Qq

Н.И. Красько, В.В. Назимко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЙ ОБРУШЕНИЕ  
ПОРОДНЫХ СЛОЕВ КРОВЛИ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ

Донецкий национальный технический университет  
83000, г. Донецк, ул. Артема, 58

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2002 года

*Исследована динамика обрушений кровли вслед за движущимся очистным забоем. Разработана геомеханическая модель для прогнозирования динамики обрушений и напряженного состояния массива в окрестности движущегося очистного забоя.*

Одной из важнейших задач горнодобывающей промышленности Украины является обеспечение безопасности и эффективности подземных работ, поскольку около 80% всех полезных ископаемых добывается подземным способом. Весьма характерное проявление горного давления – обрушение пород кровли, которое сопровождается опасными динамическими процессами перераспределения напряжений и разрушением массива в окрестности очистных забоев. Однако динамика обрушения породных слоев в кровле очистного забоя весьма сложна и трудно поддается исследованию. В натуральных условиях можно получить лишь ограниченную информацию, относящуюся только к отдельным компонентам проявления горного давления. Вместе с тем знание об эволюции напряженно-деформированного состояния горного массива в окрестности очистного забоя в процессе обрушения породных слоев кровли дает основополагающую информацию при исследовании динамических проявлений горного давления. Достаточно просто получить такую информацию можно лишь с помощью компьютерного моделирования, если выбрать подходящую геомеханическую модель изучаемого процесса.

Обрушение кровли характеризуется наличием существенно необратимых процессов в окрестности очистного забоя и примыкающего выработанного пространства. При этом главными процессами являются разрушение породных слоев (с их последующим падением на почву отработанного пласта или на ранее обрушенные породы) и самоподбуртовка вышележащих пород вследствие разрыхления обрушенных пород. Эти два процесса активно взаимодействуют, порождая сложные периодические проявления горного давления у груди очистного забоя и в выработанном пространстве. Существующие методы механики сплошной среды (в частности метод конечных и граничных

элементов) не подходят к решению задачи о перераспределении напряжений и деформаций в процессе обрушения кровли. Причина состоит в том, что в данном случае важны стадии не столько упругого и пластического деформирования, сколько обрушения и дезинтеграции пород с их последующим разуплотнением. Для решения указанной задачи наиболее подходящим (на сегодняшний день) является метод дискретных элементов, разработанный проф. Кундаллом [1]. Преимущество данного метода состоит в том, что он с одинаковой достоверностью учитывает все основные стадии, начиная с упругого деформирования через обрушение, падение и дезинтеграцию блоков с последующей дезориентацией обломков и заканчивая доуплотнением обрушенных пород. Именно этот метод использован при анализе динамики напряженно-деформированного состояния в окрестности очистного забоя в процессе обрушения кровли.

При этом были решены 12 отдельных задач, которые охватывают основные горнотехнические ситуации, чаще всего возникающие в практике угледобычи. Были выделены три основные группы задач, связанных с: обрушением кровли в штатном режиме, когда призабойное пространство и механизированная крепь остаются в безопасном состоянии; аварийным обрушением кровли, при котором происходит посадка крепи на жестко; обрушением подработанной толщи при первой посадке кровли в процессе отхода лавы от разрезной печи.

Все задачи решены для типичных горно-геологических условий, соответствующих Донецко-Макеевскому угледобывающему району. Глубина работ изменялась в пределах 500–800 м; вмещающие породы характеризовались средней прочностью и обрушаемостью; кровля состояла из отдельных слоев, мощность которых составляла от 0,5 до 5 вынимаемых мощностей угольного пласта. Скорость продвижения очистного забоя соответствовала диапазону 50–150 м/мес. Время деформирования разбивалось таким образом, чтобы длительность одного цикла пересчета напряжений и смещений составляла величину порядка 0,01–0,001 с. При общем числе циклов порядка 20–30 тысяч охватывался временной интервал, достаточный для того, чтобы описать процесс обрушения от зарождения трещин впереди очистного забоя до падения блоков породы в выработанное пространство.

На рис. 1 показано состояние модели в процессе падения породного блока на почву для случая, когда обрушение происходит с сохранением условий безопасности. Как видно, картина общего деформирования и разрушения пород весьма сходна с той, которую часто наблюдают на физических моделях или в натуральных условиях. Впереди лавы над кромкой очистного забоя отмечается локальная область ослабления кровли, при этом поврежденность массива распространяется на ограниченном участке. Такая ситуация весьма типична и часто встречается на практике. Следы локальных трещин и заколов, параллельных линии очистного забоя, можно наблюдать в непосредственной кровле очистного забоя, что характерно почти для всех лав региона. Важно отметить, что эта локальная поврежденность не приводит к потере устойчивости кровли, ее обрушению в призабойное пространство и т.п. Наличие таких заколов свидетельствует лишь о действии высокой концентрации напряжений на кромке угольного пласта, что согласуется с общими представле-

ниями о закономерностях распределения опорного давления впереди очистного забоя.

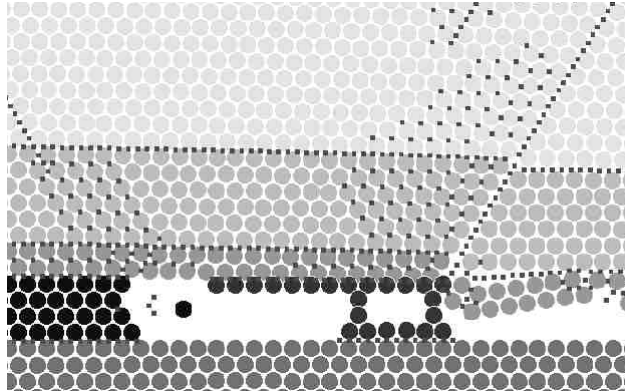


Рис. 1. Состояние модели в процессе обрушения кровли

В процессе обрушения наблюдается отслоение отдельных фрагментов угля из груди очистного забоя, что весьма типично для реальных условий и свидетельствует о том, что моделировался действительно динамический процесс обрушения кровли, а не его статическая имитация. Это усиливает достоверность результатов моделирования.

После упругой стадии деформирования (здесь она не рассматривается в силу хорошей изученности) происходит расслоение кровли вдоль слоевых контактов, причем начинается оно в первую очередь над кромкой очистного забоя и впереди него. Затем отрывистые цепочки расслоений сливаются в сплошные линии на контакте слоев. Характерно, что после нарушения контактов происходит дальнейшее расслоение пород в пределах сплошных слоев. Последующее нарушение сплошности кровли протекает в виде накопления поврежденности в форме запредельных деформаций сдвига. Такие области нарушенности появляются над краевой частью массива и режущим рядом механизированной крепи. Лишь на заключительной стадии обрушения по линии облома кровли возникают отрывные запредельные деформации. Другими словами, в начале процесса обрушения главную роль выполняют деформации сдвига, а на заключительной стадии – деформации отрыва.

Максимальная концентрация напряжений наблюдается прежде всего над краевой частью массива и посадочным рядом механизированной крепи. Распределение вертикальной нормальной компоненты наиболее контрастно по сравнению с главной и горизонтальной нормальными. Касательная компонента напряжений концентрируется в области изгиба слоя непосредственной кровли над перекрытием механизированной крепи и в нижней области краевой части пласта. При этом наибольшее значение имеет компонента напряжений, порождающая сдвиг в вертикальной плоскости. Это согласуется с тем, что активную роль в формировании напряженного состояния в окрестности очистного забоя выполняют силы горного давления. Поэтому наибольшая интенсивность касательных напряжений наблюдается в вертикальном направлении, порождающем сдвиг вдоль активной компоненты горного

давления.

Характерно, что в момент, предшествующий обрушению, нормальные напряжения распределяются более равномерно, хотя их уровень в целом выше. После обрушения слоев уровень давления заметно падает, хотя напряжения больше концентрируются над краевой частью пласта и посадочным рядом механизированной крепи (рис. 2). Такие закономерности хорошо согласуются с общими представлениями о динамике процесса обрушения, что гарантирует достоверность выводов дальнейшего анализа.

Из рис. 2 хорошо видно, что в указанных зонах в период перехода от зависания к обрушению наблюдается скачок напряжений. В целом по всем компьютерным экспериментам перепад давления над краевой частью угольного пласта составлял от 1 до 12%, а над посадочным рядом крепи – от 8 до 26%. Такая разница закономерна, поскольку концентрация напряжений впереди очистного забоя определяется весом всей зависшей толщи пород, а над посадочным рядом крепи – только нескольких слоев пород в пределах зоны полных обрушений. Поэтому обрушение нескольких слоев на фоне пригрузки краевой части пласта не так заметно изменяет напряженное состояние массива, как облом консольных частей этих слоев над посадочным рядом механизированной крепи.

Таким образом, обобщив предварительный анализ динамики процесса обрушения кровли в наиболее типичных горнотехнических ситуациях, можно выделить его главные особенности. Они заключаются в поэтапности раз-



**Рис. 2.** Динамика изменения коэффициента концентрации напряжений над краевой частью массива и над посадочным рядом механизированной крепи в процессе обрушения слоя кровли: о – на забое, Δ – на стойке

рушения кровли с последовательным участием касательных, а затем – нормальных растягивающих напряжений, а также в возникновении перепадов горного давления на 10–30% в местах облома породных слоев. Подчеркнем, что процесс обрушения протекает многостадийно, хотя и весьма быстро. Поэтому такие важнейшие параметры, как места накопления поврежденности пород кровли, концентрации напряжений и разрушений, перемещаются в пространстве и времени и на разных участках массива разные. Необходимо найти подход для обобщения процесса обрушения кровли с его описанием моделью, по возможности, простой и вместе с тем физически и геомеханически обоснованной.

В силу того, что кровля обрушается послойно, эту задачу удалось решить

только в результате следующего подхода. Как уже было отмечено, во всех случаях обрушений активное участие в накоплении поврежденности массива принимает касательная компонента напряжений, а решающую роль на завершающей стадии обрушения играет нормальная растягивающая компонента. С другой стороны, процесс зависания и обрушения кровли очистного забоя достаточно хорошо изучен с позиций теории балки или плиты в случае пространственной постановки задачи. Применимость теории балки многократно подтверждена известными отечественными и зарубежными учеными [2–4].

Из теории сопротивления материалов хорошо известно, что наиболее подходящей теорией прочности для балки является энергетическая, которая выражается следующей зависимостью:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_{x(y)}^2 + 3\tau_{x(y)}^2)} \geq [\sigma], \quad (1)$$

где  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение;  $\sigma_{x(y)}$ ,  $\tau_{x(y)}$  – нормальные растягивающие и касательные напряжения, действующие в балке-слое в направлениях  $x$  и  $y$  соответственно;  $[\sigma]$  – допустимые напряжения.

Как видим, все положения математического моделирования весьма хорошо согласуются с указанной теорией, что дает основание использовать ее в качестве базовой основы при обобщении процесса послойного обрушения толщи. В конечном итоге важно знать высоту полных обрушений, которая, как показано выше, существенно изменяется по длине выемочного столба и от которой зависит коэффициент подбуртовки вышележащей толщи.

Учтем также тот экспериментальный факт, что слои кровли активно взаимодействуют между собой в процессе деформирования и обрушения. Другими словами, поля напряжений в отдельных слоях существенно взаимовлияют друг на друга, коррелируя и согласовывая очередность обрушений и степень зависания. Можно утверждать, что есть веские основания рассматривать кровлю, состоящую из нескольких слоев, как единое целое. Важно только найти подходящий параметр для такого обобщения.

Для объединения всех слоев в единую систему был найден эквивалент на основе приведения прочностных параметров и компонент напряжений с учетом расстояния от каждого слоя до обнажения кровли в очистном забое [5]. Правомерность такого подхода уже подтверждена более ранней работой, направленной на создание геомеханической системы прогноза вывалов кровли в призабойное пространство [6]. Как показали результаты моделирования [6], процесс обрушения кровли зарождается у груди очистного забоя или на уровне посадочного ряда механизированной крепи. Именно здесь происходит первоначальное накопление поврежденности от сдвиговых деформаций, и в этих же местах впервые вступает в действие предельное растягивающее нормальное напряжение, завершая акт обрушения слоя. Поэтому правомерно приведение всех определяющих характеристик кровли к уровню обнажения или к уровню границы между непосредственной кровлей и угольным пластом. Данным подходом подчеркивается тот факт, что обрушение кровли начинается с данного места и дальнейшее развитие обрушения определяется прежде всего прочностными характеристиками пород, примыкающих к непо-

средственной кровле. Именно поэтому в классификации ДонУГИ значительное внимание справедливо уделено характеристике пород непосредственной кровли с точки зрения обеспечения самоподбуртовки, что, в свою очередь, влияет на весь дальнейший характер обрушения.

Таким образом, пределы прочности пород на растяжение, касательная и нормальная компоненты напряжений в отдельных слоях приводились к обнажению непосредственной кровли пласта по зависимости

$$\sigma = \frac{\sum \sigma_i h_i / Y_i}{\sum h_i / Y_i}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – приведенный параметр (предел прочности или эквивалентное напряжение, определяемое для каждого слоя по зависимости (1));  $\sigma_i$  – параметр приведения в конкретном  $i$ -м слое породы;  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя;  $Y_i$  – расстояние от центра тяжести  $i$ -го слоя до обнажения непосредственной кровли.

Такое приведение было осуществлено на всех этапах обрушения породных слоев для всех отработанных моделей. Приведение выполнялось на высоту текущего обрушения. Для сопоставимости при объединении всех данных в одну статистическую выборку высота полных обрушений выражалась в безразмерном виде, т.е. в величинах вынимаемой мощности пласта. В процессе компьютерного моделирования максимальная достигнутая высота полных обрушений равнялась 24 вынимаемым мощностям пласта. Это хорошо согласуется с результатами натуральных измерений, показавших, что данная высота редко превышает 30 вынимаемых мощностей.

После выполнения операций приведения определялся параметр напряженности  $S$  пород кровли по зависимости

$$S = \sigma_e / \sigma, \quad (3)$$

где  $\sigma_e$  и  $\sigma$  обозначают приведенные эквивалентное напряжение и предел прочности на растяжение.

Затем был построен график зависимости безразмерной высоты полных обрушений кровли от параметра ее напряженности. Оказалось, что между указанными параметрами существует достаточно тесная корреляционная связь ( $R^2 = 0,89$ ), которая может быть выражена линейной зависимостью. Вообще говоря, в геомеханическом смысле такая зависимость достаточно логична и ясна. Ее физический смысл заключается в том, что чем значительнее действующие эквивалентные напряжения превышают приведенный предел прочности пород, тем на большую высоту обрушится кровля. Фактор напряженности пород кровли может увеличиваться не только с уменьшением приведенного предела прочности, но и с увеличением ее прогиба в силу меньшей степени подбуртовки. Также важно, что данная зависимость учитывает все слои кровли, участвующие в процессе обрушения, и расстояние от центра тяжести слоев до обнажения непосредственной кровли. Это дает возможность обобщить процесс обрушения кровли как единого целого эквивалента, заменяющего реальную слоистую толщу, в которой процесс обрушения отдельных слоев протекает последовательно и растянут во времени и пространстве.

Установленная зависимость была положена в качестве физической основы геомеханической модели для расчета динамики обрушения кровли вслед за движущимся очистным забоем. Совокупность слоев пород непосредственной и основной кровель рассматривали как единую плиту, имеющую эквивалентные деформационные и прочностные характеристики. Приведение этих параметров производили по зависимости (2). Задачу о распределении напряжений в основании плиты-кровли решали методом конечных разностей. При этом подвигание очистного забоя моделировали на заданный шаг. В каждом узле расчетной сетки вычисляли эквивалентные напряжения и в случае нарушения условия (3) вычисляли высоту обрушения кровли. В случае обрушения кровли пропорционально высоте обрушения увеличивали жесткость основания плиты-кровли, что в физическом смысле отвечает самоподбуртовке обрушенных пород. Чем больше высота обрушения, тем значительнее эффект самоподбуртовки.

Таким образом, путем учета двух основных геомеханических процессов – обрушения и самоподбуртовки – была создана модель, способная имитировать периодичность сдвижений массива в окрестности движущегося очистного забоя. На рис. 3 показан пример распределения обрушений кровли в выемочном столбе одиночного очистного забоя для следующих условий: глубина работ 600 м, мощность пласта 1,5 м, длина лавы 200 м, скорость ее подвигания 150 м/мес, что отвечает современным темпам подвигания механизированных очистных забоев. Распределение остаточной высоты кровли, которая осталась необрушенной, хорошо отражает периодичность процесса посадки основной кровли. Шаг посадки составляет порядка 200 м, что совпадает с результатами натурных наблюдений в современных высокопроизводительных очистных забоях. Такая значительная величина шага обрушения объясняется конечной долговечностью вмещающих пород, обеспечивающей зависание кровли на значительных пролетах при высоких скоростях подвигания. Характерно, что такие периодические зависания кровли создают специфическую динамику опорного давления впереди очистного забоя, приведенную на рис. 4. Сопоставление рис. 3 и 4 свидетельствует, что пики опорного давления совпадают с периодами зависания кровли.

На рис. 5 приведена картина обрушения прочной кровли в примыкающем к ранее выработанному пространству очистном забое. Расчет, выполненный для одиночной лавы, показал, что обрушение кровли происходит только при ее первичной посадке, когда лава отошла от разрезной печи.

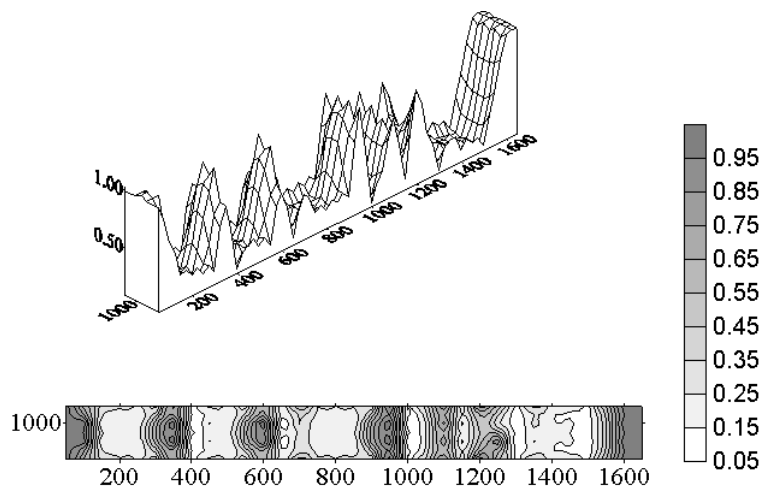


Рис. 3. Распределение мощности необрушенной кровли по длине выемочного столба одиночной лавы

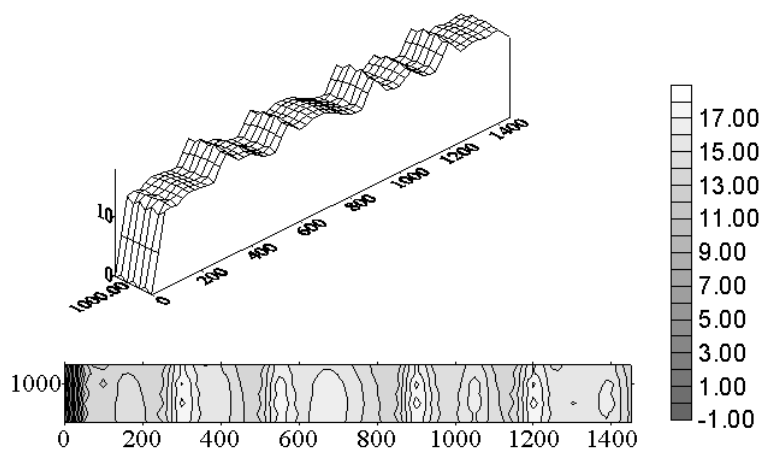
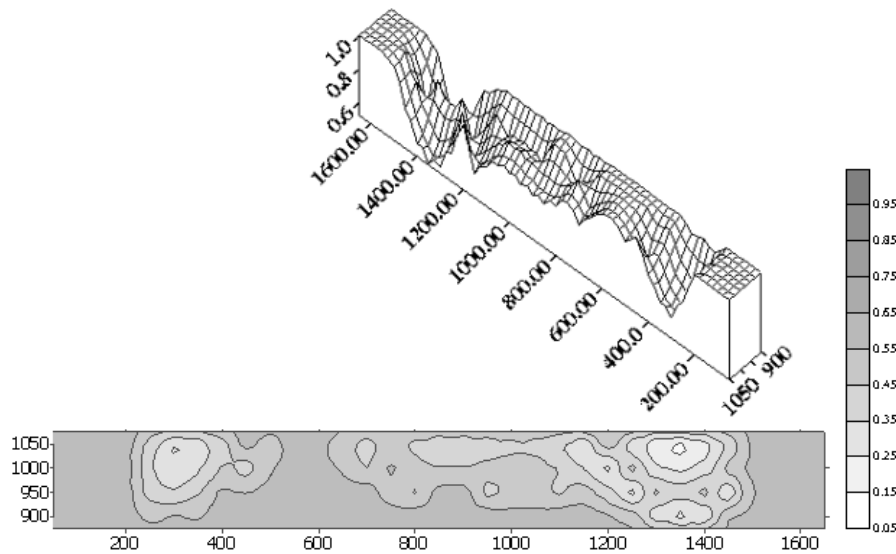


Рис. 4. Динамика опорного давления впереди движущейся лавы





**Рис. 5.** Распределение мощности необрушенной кровли по длине выемочного столба лавы, примыкающей к ранее выработанному пространству

После первичной посадки создаются условия для плавного прогиба кровли, поскольку на высоких скоростях продвижения ее пролет достигает длины, при которой изгибающие, крутящие моменты и перерезывающие силы не создают опасных или предельных эквивалентных напряжений. Как видим, в случае примыкания лавы к ранее выработанному пространству условие равновесия нарушается и наблюдается обрушение кровли со стороны примыкающего пространства. При этом распределение высот обрушения носит несимметричный характер. Такой результат хорошо согласуется с физическим смыслом и наблюдаемыми проявлениями горного давления в натуральных условиях. Выраженное зависание кровли действительно имеет место со стороны нетронутого массива.

Таким образом, созданная модель позволяет прогнозировать динамические проявления горного давления в окрестности движущегося очистного забоя при произвольной конфигурации выработанного пространства.

1. *P.A. Cundall, O.D.L. Strack*, *Geotechnique* **29**, 1, 47 (1979).
2. *Н.М. Протодьяконов*, *Давление горных пород и различное крепление*, Госгортехиздат, Москва (1930).
3. *Г.Н. Кузнецов*, *Изучение проявлений горного давления на моделях*, Углетехиздат, Москва (1959).
4. *А.А. Борисов*, *Исследование вопросов горного давления методом объемных моделей*, Госгортехиздат, Москва (1960).
5. *Н.Я. Суворов, М.И. Чугай*, *Изв. вузов. Горный журнал* № 6, 32 (1971).
6. *Ю.Б. Грядущий*, *Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях*, Техніка, Киев (1998).

*N.I. Kras'ko, V.V. Nazimko*

MODELING OF ROCK PRESSURE REDISTRIBUTION  
DUE TO ROOF CAVING IN VICINITY OF ADVANCING LONGWALL FACE

Roof caving in a longwall face has been investigated by discrete element method. It was discovered that the caving is a complex process that begins with separation and disintegration of adjacent rock layers under action of shear stress. Tensile stress acts at the final stage of the caving. New geomechanic model has been developed to simulate periodic roof caving and stress redistribution around advancing longwall face.

**Fig. 1.** State of the model during roof caving

**Fig. 2.** Stress concentration dynamics in the rib of the face and over powered support leg: o – at the face,  $\Delta$  – at support leg

**Fig. 3.** Distribution of caving height along an isolated panel advance

**Fig. 4.** Redistribution of abutment pressure in front of the longwall face along area of extraction

**Fig. 5.** Distribution of caving height along the panel adjacent to a gob