

## ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На підставі результатів інструментальних спостережень в очисних вибоях АП "Шахта ім. О.Ф. Засядька" розроблена геомеханічна модель породного масиву й обчислені раціональні силові параметри спеціальних засобів кріплення кінцевих ділянок лав. Для розрахунку напруг і деформацій у гірському масиві застосований метод кінцевих елементів (МКЕ).

## MINING INVESTIGATIONS AND MODELING OF GEOMECHANICAL PROCESSES

The geomechanical model of a rock massif based on results of instrumental observation in longwalls of A.F. Zaszjadko mine is developed. The rational force parameters of special support means for longwall end sites are calculated. The finite-element method (FEM) is applied for calculation of pressure and deformations in the mining massif.

### 1. Введение

Геомеханические процессы в породном массиве на концевых участках лав имеют некоторые особенности по сравнению с процессами в средней части очистного забоя [1]. Исследование этих особенностей и установление закономерностей геомеханических процессов позволяет не только совершенствовать существующие механизированные крепи, но и создавать новые нетрадиционные средства крепления [2]. Технологический парк "УГЛЕМАШ" разрабатывает проекты создания таких средств крепления для угольной промышленности Украины.

### 2. Задачи, методы и объекты исследования

Задачи исследования заключаются в следующем:

- определить среднюю скорость, ускорение и абсолютную конвергенцию пород в очистных забоях;
- определять среднее сопротивление стоек (кН) и рабочее удельное сопротивление секций механизированной крепи (кН/м<sup>2</sup>);
- устанавливать взаимосвязь геомеханических процессов в породном массиве с технологическими операциями выемки угля и крепления очистного забоя;
- проверять на практике гипотезу о s-образном опускании кровли в очистных забоях;
- построить в единой временной системе координат планограммы работ в лаве, фактические рабочие характеристики механизированной крепи и геомеханических процессов в породном массиве.

Шахтные натурные наблюдения являются наиболее достоверным методом исследования особенностей геомеханических процессов в горном массиве. Такие исследования выполняются методами визуального наблюдения, или с использованием специальной аппаратуры. Наилучшие результаты дает рациональное сочетание этих методов. Методика комплексных исследований в очистных забоях шахтах Донецкого угольного бассейна разработана Институтом физики горных процессов Национальной академии наук Украины совместно с До-

нецким национальным техническим университетом, Донецким научно-исследовательским угольным институтом и Донецкой государственной академией управления с участием специалистов Технологического парка "УГЛЕМАШ". Эта методика предполагает исследование особенностей взаимодействия механизированных крепей с породным массивом и установление закономерностей геомеханических процессов на разных участках очистного забоя.

### 3. Инструментальные наблюдения в очистном забое

Комплексные исследования были проведены в 9-й западной лаве пласта  $l_1$  АП "Шахта им. А.Ф.Засядько" в июле 2001 г. с участием студентов Горного института Донецкого национального технического университета [3].

Полезная мощность пласта изменяется от 1,7 до 2,0 м, составляя в среднем 1,8 м. Угол падения пласта -  $10-18^\circ$ , объемный вес угля -  $1330 \text{ кг/м}^3$  и сопротивление угля резанию -  $250 \text{ кН/м}$ . Непосредственная кровля пласта мощностью от 0,1 до 3,0 м по классификации Донуги относится к категории  $B_3$  (средней устойчивости). Основная кровля состоит из твердых песчаников и классифицируется категорией  $A_2$  (среднеобрушаемая).

Лавы длиной 230 м обрабатываются механизированным комплексом ЗМКД90.

Для инструментальных замеров и визуальных наблюдений оборудовалась замерная станция на одной из секций механизированной крепи. На четырех стойках через предохранительные клапаны устанавливались манометры МП-3, показания которых дежурный наблюдатель фиксировал с интервалами 10 мин, а во время прохода комбайна и перемещения секций крепи в районе замерной станции каждую минуту. Кроме того, выполнялись измерения конвергенции вмещающих пород стойками СУИ-2 с индикаторами ИЧТ-0,01. Показания индикаторов и манометров фиксировались одновременно. Геологическую и вынимаемую мощность пласта измеряли рулеткой один раз в смену. Расстояние от забоя до точки первого контакта перекрытия с кровлей, а также толщину породной подушки на перекрытии определяли на каждом цикле передвижки. Состояние кровли (заколы, трещины, ступени, вывалы и т. д.), размеры устойчивых обнажений пород в выработанном пространстве фиксировали с помощью фотоаппарата. Продолжительность выполнения технологических операций хронометрировали с точностью до 5 мин.

Первая замерная станция была оборудована на сопряжении 9-й западной лавы с конвейерным штреком. Затем ее перемещали вверх по лаве и в каждом месте дислокации замеры выполняли до и после прохода комбайна и передвижки секции крепи. Результаты наблюдений за смену заносятся в специальные формуляры.

### 4. Результаты инструментальных наблюдений

Средние значения сопротивления гидравлических стоек составляют около 63-69% номинального значения. Начальное сопротивление секций механизированной крепи изменяется от 181 до  $250 \text{ кН/м}^2$ . Среднее удельное сопротивление секций  $278 \text{ кН/м}^2$ , или около 85% от номинального значения.

Расстояние от консолей перекрытия до забоя изменялось от 0,3 до 0,7 м, т. е.

превышало паспортное значение в 1,6 раза. Расстояние от забоя до места первого контакта консоли перекрытия с кровлей составило 0,8 м. Причем контактирование в подавляющем большинстве случаев было не сплошным, а точечным, в основном через 3-4 точки передней части консоли. Рессорная и жесткая части перекрытия контактировали с кровлей через породную подушку толщиной от 30 до 100 мм.

Наиболее интенсивная конвергенция вмещающих пород происходит после прохода комбайна в средней части призабойного пространства на расстоянии 1,2-1,6 м от забоя, т. е. подтверждается гипотеза о s-образном опускании кровли и возникновении растягивающих напряжений в массиве при увеличении расстояния от забоя до первой стойки. При этом, линия опускания непосредственной кровли приближается к экспоненте, обуславливая образование растягивающих напряжений в нижних слоях, раскрытие трещин и вывалы породы в призабойном пространстве лавы.

#### 6. Геомеханическая модель

Моделирование, как метод познания действительности, широко применяется в различных областях науки. При решении задач горной геомеханики используются физические, аналитические и численные методы моделирования природы.

Среди методов физического моделирования наибольшее распространение получили метод эквивалентных материалов и поляризации-оптический [4]. Иногда их используют с методами структурных моделей, электроанalogии и центробежного моделирования. Сущность этих методов заключается в замене естественных горных пород такими искусственными материалами в модели, физико-механические показатели которых находятся в определенных соотношениях с аналогичными показателями объектов природы. Такая замена действительности моделью осуществляется с помощью критериев и констант подобия.

Методы физического моделирования широко апробированы при решении широкого круга задач; они обладают высокой наглядностью, но позволяют получать только качественную картину физической природы изучаемых процессов. Наряду с преимуществами физическое моделирование имеет и недостатки: невысокая точность результатов, связанная со значительным искажением (масштабным уменьшением) действительности, получение результатов в относительных показателях, высокая материалоемкость и трудоемкость изготовления моделей.

Этих недостатков лишены аналитические методы моделирования, существенное достоинство которых состоит в возможности получения количественных результатов в абсолютных показателях, более полном учете реальных свойств массива горных пород, геометрических размеров и внешних воздействий. К аналитическим относятся методы, в которых искомые показатели представляются в явном виде и могут быть вычислены с любой степенью точности, а к численным - методы, в которых сплошная среда аппроксимируется квазидискретной моделью.

По сравнению с аналитическими, численные методы более гибкие, так как

дают возможность моделировать неоднородность породного массива, различные включения и зоны ослабления трещинами, а также позволяют учитывать большее количество физико-механических характеристик пород.

Среди численных методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ), обладающий значительным диапазоном возможностей для решения различных задач горной геомеханики [5].

При использовании МКЭ породный массив заменяется квазидискретной моделью, состоящей из конечного числа плоских треугольных элементов. При этом сохраняются реальные геометрические размеры и напряжения в массиве.

Для решения задачи имитирования взаимодействия механизированной крепи с породным массивом необходимо разработать геомеханическую модель [6]. Разработка геомеханической модели включает в себя последовательное решение следующих вопросов: установление геометрических размеров расчетной схемы и способа разбиения ее на элементы с учетом исходной постановки задачи; вычленение в расчетной схеме интересующей области исследования путем вычисления внутренних сил на каждом этапе расчета и использования их в качестве внешних нагрузок в следующем этапе, то есть осуществление постепенного перехода от общего решения к частному.

Поскольку охватить весь диапазон различных сочетаний горно-геологических факторов не представляется возможным, ограничимся условиями 9-й западной лавы пласта  $l_1$  АП "Шахта им. А.Ф.Засядько", которые являются наиболее представительными для Донецкого угольного бассейна условиями залегания пластов.

Полагаем, что производится отработка пологого угольного пласта мощностью 1,8 м, залегающего на глубине около 1000 м. В основной кровле пласта залегают породы категории  $A_2$  или  $A_3$  (песчаники, мощностью от 5 до 20 м с шагом вариации в моделях 5 м), непосредственная кровля - сланец категории  $B_2$  или  $B_3$  имеющий мощность 0,1 до 3,0 м (мощность непосредственной кровли варьируется в моделях с шагом 0,1 м). В почве - однородный массив сланцев категории  $P_{2-3}$ .

Для горных пород характерны гравитационные, прочностные и деформационные свойства. Наиболее полно эти свойства отражают следующие физико-механические характеристики: плотность ( $Q$ , кг/м<sup>3</sup>), сцепление ( $C$ , Па), угол внутреннего трения ( $\varphi$ , град.), модуль упругости ( $E$ , Па) и коэффициент Пуассона ( $\nu$ ).

Геомеханическая модель представляет собой вертикальный разрез от земной поверхности до глубины 1100 м. Горизонтальные размеры модели также принимаются 1100 м. Размеры приняты априори при условии неизменности геостатических напряжений на границах. Если предполагаемые сдвигения будут выходить за границы модели, то ее размеры необходимо увеличить. Сетка конечных элементов сгущается в районе угольного пласта, где предполагаются высокие градиенты напряжений. Общее количество элементов в расчетной схеме - 2900, количество узлов - 1607.

На первом этапе решения задачи проверяется условие равновесия модели.

Расчеты выполняются для массива не подверженного влиянию горных работ и модель при этом должна сохранять геостатическое равновесие. Распределение напряжений в любом произвольном вертикальном сечении должно в точности повторять картину распределения внешних сил на границах модели.

На втором этапе моделируется проведение разрезной печи, наличие которой вызывает незначительные смещения пород и перераспределений напряжений. В последующих этапах моделируется выемка угля путем увеличения пролета кровли в выработанном пространстве на величину подвигания забоя лавы  $\Delta L$ . Расчеты выполняются до тех пор, пока не будет зафиксировано разрушение элементов, имитирующих основную кровлю, то есть, пока не произойдет первичное обрушение. Если первичная посадка кровли произошла на  $n$ -ом этапе расчетов, то предыдущее  $n-1$  решение принимается в качестве исходного для вычленения в модели участка меньших размеров, а полученные напряжения являются граничными условиями для исследуемой области.

В исследуемой области моделируется призабойная крепь путем приложения противодействующих сил к узлам элементов, имитирующих породы кровли в призабойном пространстве.

Разработанный алгоритм моделирования геомеханических процессов в горном массиве реализован комплексом прикладных программ FEM. В отличие от известных алгоритмов, в программах FEM используется полученное впервые аналитическое решение задачи формирования матриц жесткости элементов, что значительно повышает быстродействие вычислений и не требует значительного объема памяти компьютера. Наибольший эффект от использования комплекса программ FEM достигается при решении сложных задач имитирования геомеханических процессов на значительной площади горного массива, а также при решении задач моделирования взаимодействия крепи с неустойчивыми породами кровли, когда возникает необходимость сгущения сети элементов в местах высоких градиентов напряжений.

## 7. Заключение

Установлено, что для повышения адаптивности крепи к условиям неустойчивых пород кровли необходимо обеспечить возможность ее работы в режиме оптимальных силовых параметров, соответствующих горногеологическим условиям залегания пласта. Для условий неустойчивых пород кровли (категория  $B_2$ ) удельной сопротивление крепи должно изменяться от 250 до 300 кН/м<sup>2</sup>, а для среднеустойчивых  $B_3$  - от 300 до 350 кН/м<sup>2</sup>. Завышенное, или заниженное сопротивление крепи приводит к нарушению сплошности пород и вывалообразованиям в призабойном пространстве лавы.

Существующие гидравлические механизированные крепи в силу своих конструктивных особенностей не способны обеспечить оптимальные силовые режимы взаимодействия с вмещающими породами. Поэтому крепи очистных забоев, адаптивные к неустойчивым кровлям, должны иметь новую конструкцию и базироваться на новых принципах взаимодействия с вмещающими породами, обеспечивающих энергетическую стабильность системы "крепь-породный массив". Такие крепи разрабатываются с участием специалистов Технологического

парка "УГЛЕМАШ".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antypov I., Jarembash I. The peculiarities of interaction between powered support and immediate roof // International Scientific Conference of moving Technical University from Pribram to Ostrava. – 1996. - P. 74-80.
2. Sapitsky K., Antypov I. The present state and the prospects of the development of mechanised wall lining constructions // VI Sympozjum "Wybrane problemy eksploatacji zloz na duzych glebokosciach".- Gliwice, 1994.- P. 95 - 110.
3. Звягильский Е.Л., Филимонов П.Е., Антипов И.В., Щербинин Д.В. Ускорение конвергенции вмещающих пород в очистных забоях // Уголь Украины.- 2002.- N 8.- С. 33-36
4. Филимонов П.Е., Антипов В.И. Методы моделирования объектов горной геомеханики // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. Сб. научн. тр.– Донецк: ООО "Норд Компьютер", 2002. – С. 20–21.
5. Antypov I., Filimonov P., Shcherbinin D. Finite Element Method in geomechanics // DonNTU.- Donetsk, 2001.- P. 86-88.
6. Филимонов П.Е. Моделирование взаимодействия механизированных крепей с вмещающими породами методом конечных элементов // Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва / Під. загальною редакцією А.Д.Алексеева.– Донецьк: ДУНВГО, 2001.– С. 149–157.

УДК 622.742.001.57:621

В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАЛКОВОГО КЛАССИФИКАТОРА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Моделювання впливу параметрів валкового вібраційного класифікатору виконано на основі експериментальних досліджень та їх апроксимації за допомогою регресивних залежностей лінійного та нелінійного типів. Встановлено залежність продуктивності від трьох різних факторів.

### MODELING OF INFLUENCE OF SHAFTING QUALIFIER PARAMETERS ON PRODUCTIVITY

The modeling of influence of the shafting vibrating qualifier parameters executed on the basis of experimental researches and their approximation with help recourse dependences of linear and nonlinear types. The dependence of productivity on three various factors is established.

Экспериментальные исследования зависимости производительности валкового вибрационного классификатора от его режимных, конструктивных параметров, влажности и плотности сыпучей горной массы показали существенное влияние каждого из варьируемых факторов [1, 2]. Графический анализ экспериментальных результатов показал различную степень нелинейности установленной зависимости. В промышленных условиях эксплуатация классификатора производится под влиянием нескольких факторов одновременно, поэтому в процессе исследований устанавливался характер изменения зависимости производительности не только от одного из варьируемых факторов, но и влияние других параметров, что позволило получить более полную базу данных для аналитической аппроксимации полученных графиков. Так, на рис. 1 а, б, в показаны результаты экспериментальных исследований производительности классификатора от частоты вращения валков  $\omega$  (400-1320 об/мин), влажности сыпучей среды  $\theta$  (2-20%) и угла наклона грохота  $\alpha$  (1-15 град). При этом была