

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МКЭ-МДЭ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НДС ПОДРАБАТЫВАЕМОГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Н. М. Климкович¹⁾, Чжан Шици²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск,
nikita.klimkovitch@yandex.ru

²⁾Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, 1471972834@qq.com

Рассматривается возможность применения сопряженных алгоритмов МКЭ-МДЭ при моделировании геомеханического состояния подработанного породного массива, с целью построения таких расчетных схем, которые позволят моделировать геомеханическое состояние породной толщи от глубины ведения горных работ до дневной поверхности. Зоны нарушения сплошности породного массива исследуются с точки зрения МДЭ, остальные – с использованием МКЭ.

Ключевые слова: метод конечных элементов; метод дискретных элементов; зона техногенной трещиноватости; уравнение Лагранжа второго рода; массив горных пород.

APPLICATION OF FEM-DEM ALGORITHMS IN MODELING THE SSS OF A ROCK MASS DURING MINING

N. M. Klimkovich¹⁾, Zhang Shiqi²⁾

¹⁾Belarusian State University, Belarus, Minsk, nikita.klimkovitch@yandex.ru

²⁾Belarusian State University, Belarus, Minsk, 1471972834@qq.com

The possibility of application the coupled FEM-DEM algorithms in modeling the geomechanical state of a mining rock mass is considered, with the purpose of constructing such calculation schemes that will allow modeling the geomechanical state of the rock strata from the depth of mining to the Earth's surface. Zones of discontinuity of the rock mass are investigated from DEM point of view, the rest – using the FEM.

Keywords: finite element method; discrete element method; technogenic cracking zone; Lagrange equation of the second kind; rock mass.

Введение

Построение моделей, позволяющих определить геомеханическое состояние подработанного породного массива по всей его высоте (от глубины ведения горных работ до дневной поверхности) является одной из

актуальных задач современной геомеханики. Основная сложность при разработке таких моделей заключается в том, что в ходе ведения очистных работ в массиве горных пород формируются области с разным структурным состоянием.

Одним из перспективных подходов для решения такого класса задач является комбинация нескольких численных методов. Такие методы базируются на преимуществах каждого из методов и нивелируют недостатки друг друга. Наилучшие результаты при решении подобных классов задач показывает сопряжение численных методов механики сплошных сред и механики дискретных сред [1]. Так, методы, основанные на понятии сплошности среды, плохо моделируют процессы, связанные с разрушением или образованием блочной структуры в массиве горных пород, в то время как дискретные методы неэффективны для изучения материалов на стадии предразрушения [2, 3].

Таким образом, в данной статье будет рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) подработанного породного массива с учетом образования зон техногенной трещиноватости. Так, в областях, в которых наблюдается нарушение сплошности среды, решение вычисляется с помощью модели, базируемой на алгоритмах метода дискретных элементов (МДЭ), а в «сплошных» зонах – с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Сопряженный МКЭ/МДЭ алгоритм выполнения компьютерного моделирования.

В качестве модельной задачи рассматривается процесс отработки породного массива широким очистным забоем (лавой).

Задача состоит из двух расчетных шагов в плоско-деформированной постановке.

На первом шаге определяется начальное (естественное) НДС породного массива. На данном шаге решение строится на основе алгоритмов МКЭ. Граничное условие на нижней грани модели представляет собой условие жесткого закрепления. К боковой границе прикладывается горное (литостатическое) давление величиной ρgh . Задача решается в поле сил тяжести. Каждая задача рассматривается в полных напряжениях, т.е. на каждом последующем шаге учитываются напряжения, полученные на предыдущем шаге. На данном шаге массив рассматривается как упругая среда.

Перед тем как перейти ко второму шагу необходимо определить размеры зоны полных сдвижений и активного трещинообразования, ко-

торая в дальнейшем будет рассматриваться с точки зрения модели, основанной на алгоритмах МДЭ.

Определение размеров зоны полных сдвижений и активного трещинообразования проводится после отработки лавы своего участка. В данном случае, горизонтальный размер зоны нарушения сплошности определяется областью, в которой превышает критическое значение по напряжениям сжатия, вертикальный размер – областью, в которой нарушается критерий Кулона-Мора [4].

На втором шаге определяется НДС породного массива после окончания активного процесса сдвижения пород.

На данном шаге, граничное условие в виде горного давления заменяется на условие ограничения перемещений по нормальям к боковым границам модели. «Сплошная» часть горного массива начинает рассматриваться как упругопластическая среда. Область полных сдвижений и активного трещинообразования заменяется блочными элементами в соответствии с моделью, базируемой на алгоритмах МДЭ. Для данной модели принимаются следующие предположения:

- Все тела модели представляют собой точечные массы;
- «Сильное» взаимодействие (взаимодействие с ближайшими телами) представляется вязкоупругой связью (демпферами);
- «Слабое» взаимодействие представляется упругой связью (рисунок 1, а);
- Положение всех элементов системы определяется с помощью системы уравнений Лагранжа второго рода.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = - \frac{\partial G}{\partial \dot{x}}$$

Аналитическое решение для системы уравнений Лагранжа второго рода может быть получено путем составления лагранжиана и определения правой части уравнения (1, б) в обобщенных координатах для расчетной схемы, приведенной на рисунке 1.

Начальные условия для расчетной схемы МДЭ, могут быть заданы в виде перемещения, скорости, нагрузки или динамической нагрузки (импульса).

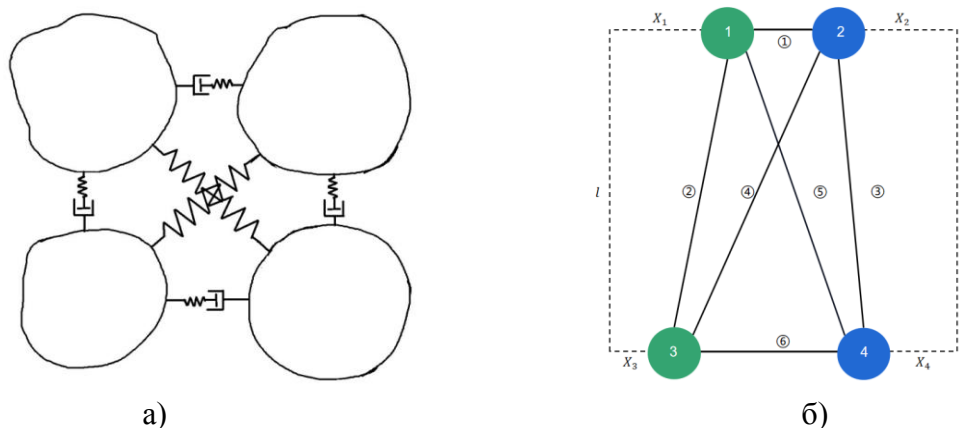


Рис. 1. Частный случай простой системы, состоящей из четырех тел:

а) общий вид; б) вид в обобщенных координатах

Таким образом, с помощью данного алгоритма может быть определено НДС породного массива по всей его высоте, т.е. от глубины ведения горных работ до дневной поверхности, а также такая важная геомеханическая характеристика как мульда сдвижений (область земной поверхности подверженная влиянию горных работ) (рисунок 2).

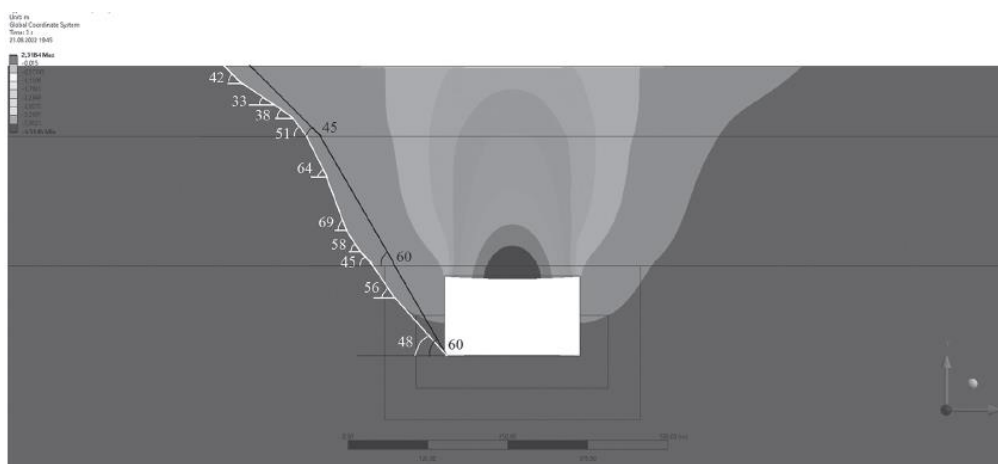


Рис. 2. Распределение вертикальных перемещений в породном массиве после окончания активного процесса сдвижения пород

Заключение

Таким образом, показано применение сопряженного алгоритма МКЭ-МДЭ при решении класса задач, связанных с определением НДС подработанного породного массива от глубины ведения горных работ до дневной поверхности и учетом образования зон техногенной трещиноватости. Поведение элементов в зоне полных сдвижений и активного тре-

щинообразования, определяемой согласно критерию предельных сжимающих напряжений и критерию Кулона-Мора, моделировалось в соответствии с аналитической моделью, основанной на системе уравнений Лагранжа второго рода, составленных для множества точечных масс, соединенных между собой упругими и вязкоупругими связями, а поведение «сплошного» массива до дневной поверхности – с помощью МКЭ.

Библиографические ссылки

1. Журавков М. А. «Современные численные методы в механике: курс лекций / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2022. – 132с.
2. Li Sh, Zhao Mh, Wang Yn, Wang Jg. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process // Comput. Mech., WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Tsinghua University Press & Springer-Verlag, Beijing, China, 2004
3. Ariffin, A. K. Hybrid finite-discrete element simulation of crack propagation under mixed mode loading condition / A.K. Ariffin, S. Huzni, M.J.M. Nor, Nan Mohamed // Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 2006; 195. pp. 4579-4593.
4. Журавков М. А., Николайчик М. А., Климкович Н. М. Моделирование геомеханического состояния породного массива при отработке подземного пространства большими площадями // Механика машин, механизмов и материалов. 2022, №4. – с. 97-104.