

УДК 622.831.232.001.57

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.132

Дмитриев Сергей Владимирович
аспирант,
Горный институт КНЦ РАН,
184209 г. Апатиты, Мурманская обл.,
ул. Ферсмана, 24
e-mail: dsvofficialmail@mail.ru

Dmitriev Sergey V.
post-graduate student,
The Mining Institute of KSC RAS,
184209, Apatite, Murmansk region,
24 Fersman st..
e-mail: dsvofficialmail@mail.ru;

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ
ГОРНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ***

**SIMULATION
THE STRESSED-DEFORMED ROCK
MASSES STATE TAKING INTO ACCOUNT
THE HETEROGENEITIES**

Аннотация:

Описано расширение метода конечных элементов контактным элементом на границах двух сред для учета сдвиговой составляющей при расчете напряженно-деформированного состояния массива горных пород в рамках программного комплекса Sigma GT.

Abstract:

The expansion of the finite element method by the contact element on the borders of the two zones for consideration the displacement component in calculation rock mass stressed-deformed state in the framework of Sigma GT software is adduced.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, модель, метод конечных элементов, контактный элемент, неоднородность

Key words: stressed-deformed state, model, finite element method, contact element, heterogeneity

Своевременное прогнозирование формирования зон концентрации напряжений позволяет повысить эффективность и безопасность ведения горных работ при разработке опасных по горным ударам месторождений. Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород позволяет еще на этапе проектирования оптимизировать конструктивные параметры систем разработки и порядок ведения горных работ.

На прочностные свойства горных массивов оказывают влияние не только составляющие их типы пород, но и разного рода разрывы сплошности. Исходя из этого, оценка влияния трещиноватости массива горных пород является одной из основных задач моделирования в геомеханике.

Изучение состояния скальных массивов возможно в двух вариантах – экспериментальном и теоретическом (аналитические и численные методы). Экспериментальные исследования основаны на натурном изучении и лабораторных испытаниях горных пород, теоретические – используют общие физические принципы процессов деформирования и разрушения. Оптимальным является комплексный подход.

Экспериментальные исследования обладают большей точностью, но носят дискретный характер и не позволяют проводить прогноз динамики НДС при ведении горных работ. По мере проведения горных выработок происходят отклонения от экспериментальных условий, что приводит к снижению достоверности результатов.

Численные методы позволяют построить модель напряженно-деформированного состояния горного массива и выбрать рациональный порядок ведения работ на стадии долгосрочного и перспективного планирования. Адекватность разрабатываемой модели может быть определена сравнением полученных при моделировании результатов и

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751

натурных экспериментальных данных. При этом одним из основных критериев адекватности является учет параметров неоднородности и трещиноватости массива.

Поведение трещиноватой массы породы под нагрузкой зависит не только от типа и величины прикладываемых нагрузок и сжатия, но и от детальных свойств компонентных трещин – жесткости и прочности, от текстуры системы трещин в целом – ширины трещин, ориентации, устойчивости и т. д.

Основными параметрами трещин являются следующие:

- K_n – жесткость перпендикулярно трещине, зависящая от отношения площади контакта между двумя стенками трещины, от амплитуды, распределения пролета в перпендикуляре и от характеристик заполняющих материалов, если они имеются;
- K_s – тангенциальная жесткость, зависящая от шероховатости стенок трещин, определяемой распределением, амплитудой и углом наклона неровностей, от распределения и амплитуды тангенциального проема и от характеристик заполняющих материалов, если они имеются;
- S – прочность трещины на сдвиг, зависящая от трения вдоль трещины, от сцепления, благодаря взаимной блокировке, и от прочности заполняющего материала, если он имеется.

Метод конечных элементов при решении геомеханических задач

Программный комплекс Sigma GT, разработанный в Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук в лаборатории геомеханики, обладает

- пользовательским интерфейсом для создания как глобальных, так и локальных трехмерных моделей, редактирования координат и параметров их отдельных элементов;
- расчетным модулем напряженно-деформированного состояния моделей;
- возможностью отображения результатов моделирования в рамках самого комплекса и интеграцией со сторонними системами визуализации.

В основе расчетного модуля комплекса лежит численный метод решения задач теории упругости для неоднородных сред – метод конечных элементов (МКЭ). При решении задач горного дела важным преимуществом МКЭ является возможность учета сложной геометрии выемки, конструктивных особенностей крепи и структурных неоднородностей массива горных пород. Метод позволяет осуществить постановку серии последовательных расчетов с целью моделирования истории нагружения горного массива и процесса горнопроходческих работ. Еще одним важным фактором является достижимость требуемой точности в определении деформаций и напряжений в рассматриваемых точках расчетной области [2].

Метод конечных элементов, в отличие от формулировки и решения задачи теории упругости в дифференциальной форме, базируется на принципах математического аппарата, называемого вариационным исчислением. При этом для задач механики твердого деформированного тела используется фундаментальный принцип сохранения механической энергии:

$$\{F\} = [K]\{W\}, \quad (1)$$

где $\{F\}$ – вектор внешних сил, $\{W\}$ – вектор перемещений узлов, $[K]$ – матрица жесткости системы размерностью $n=N_T*N_C$, причем N_T – количество узловых точек, N_C – количество степеней свободы.

Именно посредством разбивки (или дискретизации) области на элементы, по своей сути составляющей часть решения задачи, которая заменяет собой аппарат интегрально-дифференциального исчисления, необходимый при рассмотрении континуумов, представляется возможным решение методом конечных элементов сложных дифференциальных уравнений. Фактически МКЭ позволяет решать дифференциальные уравнения, заменяя их системой линейных алгебраических уравнений, что облегчает нахождение решения и, кроме этого, позволяет решать задачи практически любой сложности.

Применение метода конечных элементов для решения практических задач предполагает создание модели объекта, его дискретизацию (разбивку или расчленение на элементы), решение больших систем уравнений, подготовку исходных данных, интерпретацию результатов моделирования и их наглядное представление [3].

Моделирование нарушений при использовании метода конечных элементов

При использовании метода конечных элементов возможны три основных способа представления трещиноватых массивов:

1. Трещины моделируются в виде контактов с помощью контактного элемента.
2. Трещиноватый массив заменяется сплошной эквивалентной средой и моделируется многослойной моделью.

3. Отдельные трещины представляются слоем обычных 4-х узловых конечных элементов (при двумерном моделировании) или 8-ми узловых (при трехмерном). Предполагается, что слой, содержащий трещину, включает в себя также и ослабленную зону оперения данной трещины, то есть параметры слоя элементов должны учитывать как свойства непосредственно заполнителя трещины, так и свойства блоков ненарушенной породы. Учесть и те, и другие параметры можно путем усреднения характеристик в пределах слоя элементов [4].

Применение численных методов при решении задачи о напряженно-деформированном состоянии, прочности и устойчивости трещиноватых скальных массивов требует использования специальных контактных элементов, позволяющих моделировать нарушения сплошности [1].

В настоящее время в программном комплексе Sigma GT возможно моделирование неоднородностей заполнением замещающим материалом (рис. 1), без учета смещений поверхностей контакта трещины.

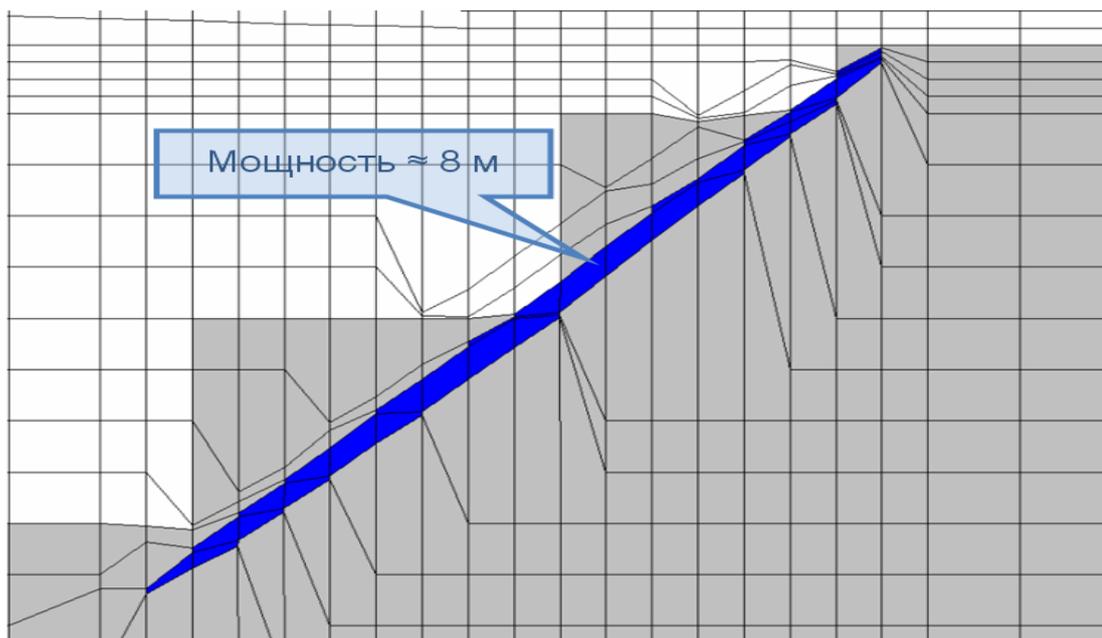


Рис. 1 – Разломная структура в борту Ковдорского карьера

Дальнейшей задачей является учет сдвиговой составляющей путем использования контакт-элементов на границе разномодульных сред.

Наиболее широкое распространение в рамках метода конечных элементов получил контактный элемент Гудмана (рис. 2), позволяющий с достаточной для инженерных целей степенью точности моделировать трещины с гладкой поверхностью контакта [1].

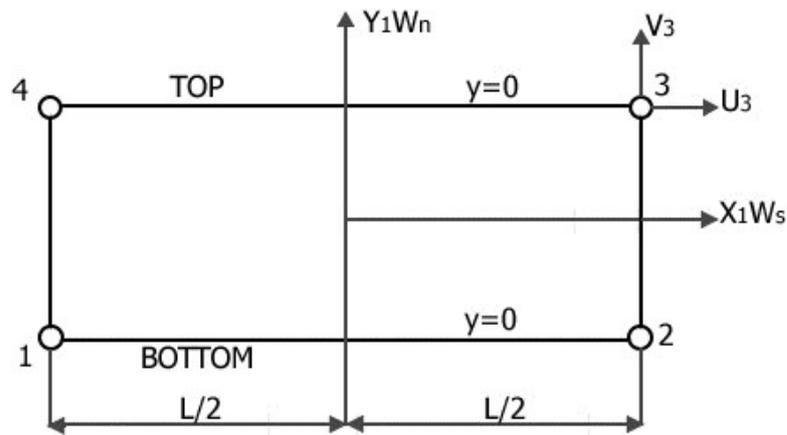


Рис. 2 – Плоский контакт-элемент трещины, ширина равна нулю, система локальных координат

Определяющие уравнения такого элемента связывают напряжения и относительные смещения контактных поверхностей на основе аппроксимации экспериментальных данных:

- Y_1, X_1 – локальные координаты;
- U – нормальные относительные смещения в узловой точке;
- V – касательные относительные смещения в узловой точке;
- W_s – тангенциальная деформация;
- W_n – нормальная деформация.

W – вектор относительного смещения, выраженный через W_s и W_n :

$$(W) = \begin{Bmatrix} W_s^{\text{верх}} & -W_s^{\text{низ}} \\ W_n^{\text{верх}} & -W_n^{\text{низ}} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Напряжения в центре контакт-элемента Гудмана выражены через

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = K \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

$$(K) = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение в контакт-элементе;

σ_n – нормальное напряжение в контакт-элементе;

(K) – диагональная матрица свойств материала, выражающая жесткость трещины на единицу длины в перпендикулярном и тангенциальном направлениях;

dU – нормальные относительные смещения в узловой точке;

dV – касательные относительные смещения в узловой точке.

Контактный элемент Гудмана характеризуется следующими свойствами:

1. Толщина линейного шва имеет нулевое или близкое к нулевому значение.
2. Сопротивление нормальному растяжению элемента близко к нулю.
3. Элемент обладает высоким сопротивлением нормальному сжатию, но имеет возможность при этом деформироваться за счет заполнителя трещины или неровностей стенок, разрушающихся или сглаживающихся при сжатии [1].

На рис. 1 видно, что вблизи разломной структуры наблюдается искривление конечно-элементной сетки. Поскольку контактный элемент вводится на участках контакта двух разнородных контактирующих поверхностей, он объединяет их в одну систему с помощью слоя нулевой толщины, позволяя тем самым не полностью совпадать узлам соседних элементов.

Несмотря на свои преимущества, применение контактных элементов имеет некоторые ограничения. Их использование рационально в случае моделирования немногочисленных основных нарушений сплошности скального массива, таких как разломы или крупные сдвиговые трещины [2]. С внедрением контактного элемента на границе очередной разломной структуры размерность конечно-элементной сетки будет увеличиваться минимум на два блока в каждом из направлений. На рис. 3 изображено блочное представление разломной структуры, имеющее ступенчатый вид. В данном случае при внедрении контактного элемента на границе двух сред у каждого блока размерность всей модели может вырасти на 40, 83 и 39 слоев в направлениях X , Y и Z , соответственно.

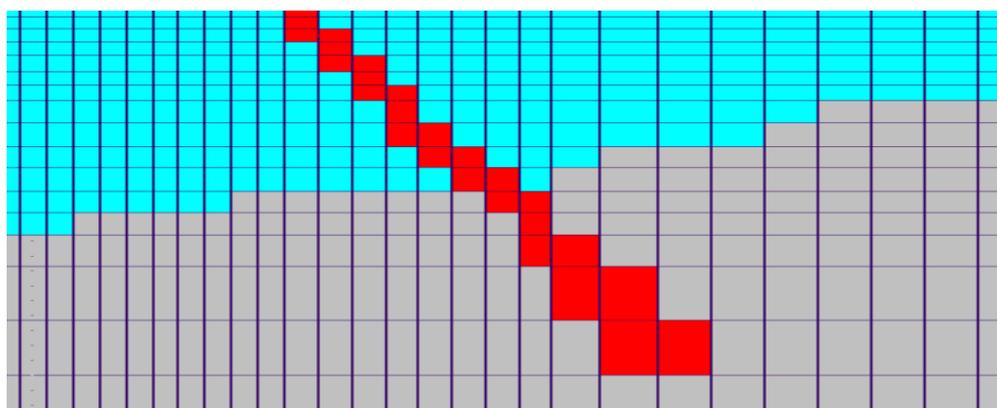


Рис. 3 – Разломная структура в породах Кукисвумчоррского месторождения

Для минимального увеличения размерности предлагается формирование сеток конечных элементов с учетом направления структурных неоднородностей (рис. 4). Тогда размерность модели возрастет в меньшей степени. Максимальное увеличение всей конечно-элементной сетки может составить 2, 2 и 2 слоя в направлениях X , Y и Z , соответственно.

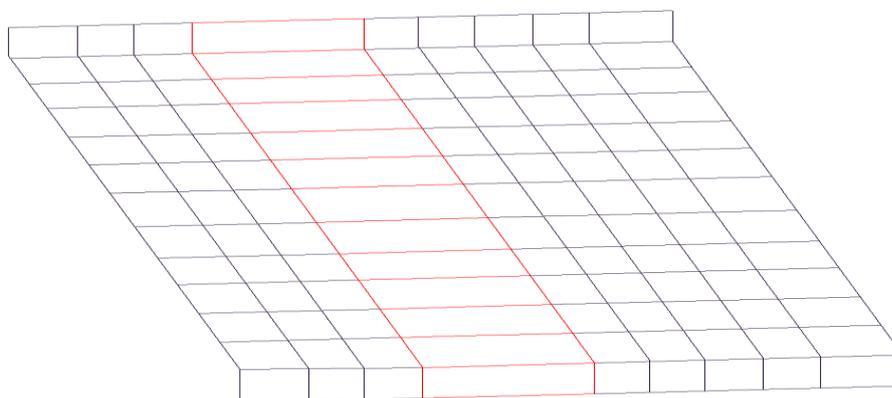


Рис. 4 – Сетка конечных элементов в окрестности разломной структуры

Заключение

Для большей адекватности модели фактическому напряженно-деформированному состоянию геологической среды с неоднородностями требуется учет не только свойств композитного материала, но и нарушений его сплошности. Для изучения влияния неоднородностей массива и особенностей сдвига на границе сред на его геомеханическое состояние предлагается применение расширения метода конечных элементов контакт-элементами Гудмана. Предложен вариант формирования сетки конечных элементов для минимального увеличения размерности модели при учете неоднородных структур.

Литература

1. Конюхов Д.С. Изучение механических свойств крупных трещин методом математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук / Д.С. Конюхов. - М., 2000. - 171 с.
2. Ламонина Е.В. Численное моделирование трещиноватых скальных массивов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Ламонина. - М., 2006. – 24 с.
3. Семенова И.Э. Исследование закономерностей обрушений подработанных пород в скальных тектонически напряженных массивах (на примере апатитовых рудников Хибин): дис. ... канд. техн. наук. – Апатиты, 2006. – 177 с.
4. Юфин С.А. Анализ напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных пород с использованием численных методов / С.А. Юфин, Е.В. Ламонина // ГИАБ . - 2008. - № 10.