

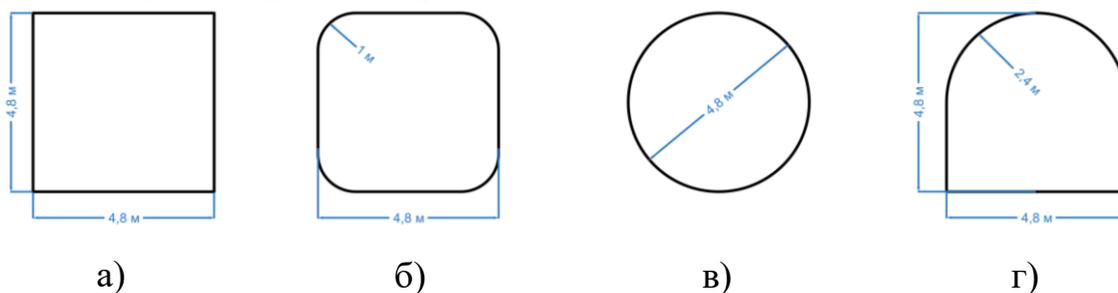
РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ПОДРАБАТЫВАЕМОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

И.Н. Карпович, С.Н. Лопатин, М.А. Журавков

Беларусский государственный университет, Минск, Беларусь

Введение. Задачи механики горных пород и массивов, связанные с исследованием напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород блочной структуры, относятся к одним из наиболее сложных. Они требуют применения специальных подходов и методов, разработки сложных алгоритмов для построения решений требуемой точности [1, 2, 3]. В данной работе разработаны алгоритмы механико-математического моделирования геомеханических процессов в массивах горных пород с подземными сооружениями с использованием сопряжения метода конечных (МКЭ) и метода блочных элементов (МБЭ). В частности, моделируется процесс разрушения и трещинообразования с последующим формированием блочных структур в массиве горных пород при ведении горных работ применительно к месторождениям соляных пород, имеющим слоистую структуру.

Сопряженный алгоритм решения задачи. Задача состоит в моделировании НДС массива соляных пород в окрестности одиночных выработок различного поперечного сечения с учетом формирования зон техногенной трещиноватости в их окрестности. Глубина залегания выработок рассматривается равной 1170 м.



а) – прямоугольное сечение, б) – прямоугольное сечение со скруглёнными углами,
в) – круглое сечение, г) – арочное сечение

Рисунок 1. Рассматриваемые поперечные сечения выработок

В качестве материала в окрестности выработки выбрана каменная соль соответствующую Старобинскому месторождению [3].

Для расчёта начального НДС используются следующие граничные условия (ГУ):

- жёсткая заделка в основании модели.
- нормальное гидростатическое давление на верхней грани модели.

Данное граничное условие моделирует давление вышележащих слоев породной толщи. Значение гидростатического давления вычисляется по следующей формуле.

$$P = \rho gh \quad (1)$$

где ρ – средняя плотность породы, g – ускорение свободного падения, h – глубинная отметка верхней грани модели.

– боковое давление, обусловленное наличием гидростатического давления.

$$P = \rho gh_j \quad (2)$$

где ρ – средняя плотность породы, g – ускорение свободного падения, h_j – глубинная отметка, значение которой варьируется от 1080 м до 1200 м.

– задача решается в поле силы тяжести. То есть, учитывается собственный вес всех элементов рассматриваемой модели.

На следующем шаге, для расчётной схемы с учетом наличия выработки рассматриваются аналогичные ГУ. Однако, вместо задания бокового давления вводятся ограничения на нормальные перемещения. Таким образом, на этом этапе расчётов задача решалась в полных напряжениях и дополнительных перемещениях [4]. Начальное НДС для проходки массива зачитывается из предыдущих расчетов.

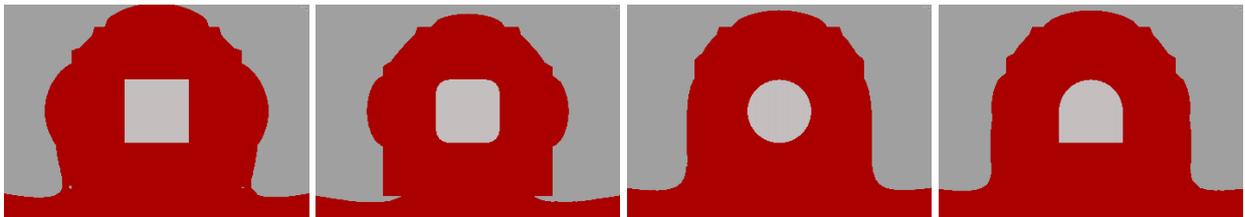


Рисунок 2. Оценка ПС массива в окрестности одиночных выработок по комплексному критерию ПС на глубине 1170 м; красный цвет – зоны ПС [3]

Для анализа областей предельного состояния в массивах горных пород было выбрано два критерия - критерии Лэйда и Гриффитса.

Критерий Гриффитса [3]:

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 &\leq 8\sigma_{tens}(\sigma_1 + \sigma_3) \text{ при } \sigma_1 + 3\sigma_3 > 0, \\ \sigma_3 &= \sigma_{tens} \text{ при } \sigma_1 + 3\sigma_3 < 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Критерий Лэйда [3]:

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^m \leq \eta_1, \quad (4)$$

$$I_1 = \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3, I_2 = \frac{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 - (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1)^2 - (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_2)^2}{6}, I_3 = \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_2 \bar{\sigma}_3,$$

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \alpha p_a, \quad \bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + \alpha p_a, \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3 + \alpha p_a,$$

где, σ_{tens} – предел прочности при растяжении, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные значения тензора напряжений, I_1, I_2, I_3 – инварианты тензора напряжений, α, m, p – экспериментально определяемые параметры горных пород.

На рисунке 4 показаны результаты при использовании критерия Гриффитса. В теории Гриффитса рассматривается разрушение материала как процесс образования трещин. Согласно критерию Гриффитса предполагается, что разрушение при растяжении в хрупких материалах начинается в вершине трещины. Поэтому, при распространении данного критерия на исследование ПС породных массивов, следует учитывать, что на основе критерия Гриффитса можно определить главным образом зоны образования трещин в массиве.

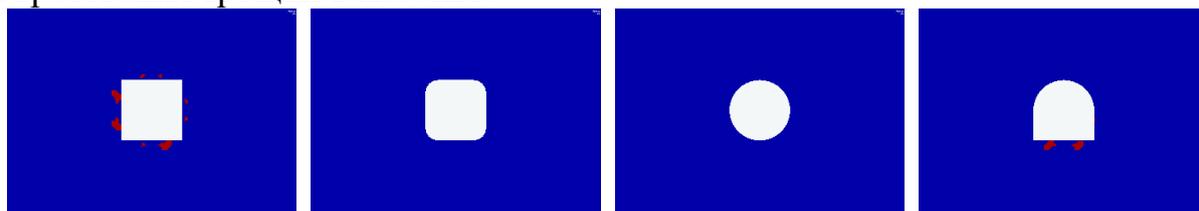


Рисунок 4 – Схема формирования блочной структуры в соответствии с критерием Гриффитса на глубине 1170 м

На рисунке 5 показаны результаты при использовании критерия Лэйда. На больших глубинах по критерию Лэйда прогнозируется появление лишь небольших зон ПС в окрестности выработок всех рассматриваемых сечений, за исключением круглого. Таким образом, можно сделать вывод о том, что критерий Лэйда характеризует ПС массива горных пород не с точки зрения его перехода в новое структурное состояние, а с точки зрения потенциального разрушения.

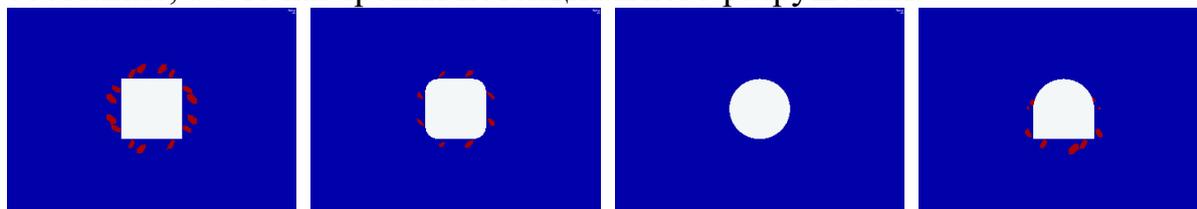
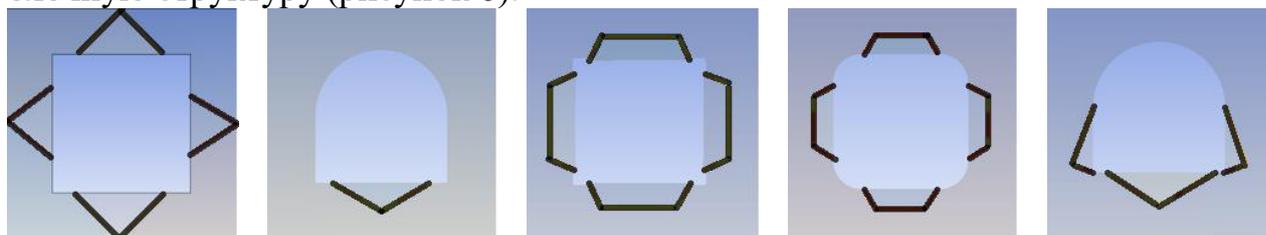


Рисунок 5. Схема формирования блочной структуры в соответствии с критерием Лэйда на глубине 1170 м [3]

Согласно данным критериям было выполнено разбиения массива на блочную структуру (рисунок 6).



5. **Рисунок 6 – Формирование блочной структуры в окрестности выработки в соответствии с критериями на глубине 1170 м**

С помощью программного комплекса Itasca 3DEC было выполнено моделирование массива блочной структуры методом дискретных элементов. На рисунке 7 показаны перемещения массива горных пород с учетом образовавшейся блочной структуры.

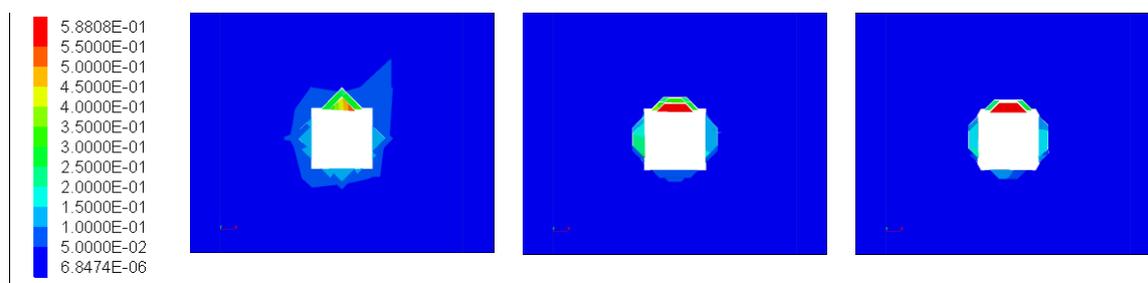


Рисунок 7. Поведение массива блочной структуры при решении МДЭ

Выработка прямоугольного поперечного сечения и прямоугольного сечения со «скругленными» углами. В окрестности выработок по их контуру формируются четыре блоковых структуры. Вывалы наблюдаются во всех четырех блоках. Верхний блок обрушается первым, за ним боковые. Одновременно с этим имеет место подъем нижнего блока. Вывал в верхнем блоке происходит на высоту порядка 0.6 метра. Боковые блоки смещаются в выработанное пространство на величину от 0.22 м до 0.45 м. Таким образом, для выработок прямоугольной формы поперечного сечения всегда формируется свод обрушения, в связи с чем происходит обрушение пород в кровле выработки.

Выработка арочного поперечного сечения. Согласно критерия Гриффитса формируется только один блок в почве выработки. При этом перемещения в блоке незначительные и только порядка 19% поверхности грани нижнего блока имеют отрыв, остальная часть блока не имеет отрыва от окружающего массива. В случае использования критерия Лэйда, вокруг выработки имеет место три блока: два боковых и один нижний. Боковой

блок имеет отрыв только верхней части поверхности, составляющей 9% от общей поверхности грани. Нижний блок незначительно смещается в область выработанного пространства. Выработка арочной формы поперечного сечения имеет самое малое количество блочных элементов вокруг выработки, которые отделяются от вмещающего массива горных пород.

Заключение. Анализ полученных результатов позволяет определять параметры формирования блочных структур в подработанном массиве, подверженному разрушению, а также выбрать наиболее подходящий критерий трещинообразования. Использование сопряженного алгоритма МКЭ-МБЭ и критериев Лэйда и Гриффитса позволяет моделировать и анализировать процессы трещинообразования и разрушения в массивах горных пород в окрестности подземных выработок. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве подземных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.А. Журавков, М. Д. Мартыненко Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных горных пород. Мн.: Университетское, 1995. 255с
2. Бабешко, В.А. О теории и приложениях метода блочного элемента / В.А. Бабешко В.А., О.В. Евдокимова, О.М. Бабешко // Вестник Южного научного центра. 2013. Том 9. С. 9–19.
3. Чанышев, А.И. Математические модели блочных сред в задачах механики. Ч. 1. Деформация слоистой среды / А.И. Чанышев, Л.Л. Ефименко // ФТПРПИ. – 2003. – № 3. С. 72–84.
4. Лопатин С.Н. Предельное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями: дис. к.ф.-м.н.: 01.02.04 / С.Н. Лопатин. – Минск, 2023. 181 с.
5. Senís, M. & Varona, P. 2008. 3DEC numerical modeling of the Tindaya Mountain Project. In Hart, Detournay & Cundall (eds) Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geo-Engineering – 2008, Paper 07-07. Minneapolis: Itasca.
6. Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. Компьютерное моделирование в геомеханике / Под общ. ред. М.А. Журавкова. Мн. БГУ, 2008. 443 с
7. Bandis, S.C. 2004. Numerical modelling of discrete materials in rock mechanics: developments and engineering applications. 1st Int. UDEC/3DEC Symp., Sep. 29-Oct. 1, 2004, Bochum, Germany.