

УДК 622.83

И.Г. САХНО, к.т.н., доц.

С.Г. НЕГРЕЙ, к.т.н., доц.

А.А. ЛЫЗЕНКО, студент

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Проведен анализ напряженно-деформированного состояния разрушенных горных пород с учетом критерия Кулона-Мора методом конечных элементов.*

*Проведено аналіз пружно-деформованого стану гірничих порід з урахуванням критерія Кулона-Мора методом скінчених елементів.*

В последние годы значительный рост информационных технологий обусловил широкое применение компьютерной техники для анализа напряженно-деформированного состояний тел в различных отраслях науки. Для этой цели применяются различного рода расчетные пакеты, основанные на численных методах решения. Наиболее распространенным из них является метод конечных элементов (МКЭ) или метод Ритца. Хотя основные принципы МКЭ сформулированы давно, широкое распространение метод получил во второй половине двадцатого столетия, что связано с развитием вычислительной техники. Несмотря на свою популярность этот метод, равно как и любой другой вариационный метод, имеет существенный недостаток – сложность получения априорных оценок. Поэтому для применения метода с достаточной точностью необходимо производить сравнение каждой расчетной программы с экспериментальными данными, то есть, необходима верификация модели.

При решении вопросов горной геомеханики зачастую возникает необходимость смоделировать некоторую область массива, представленную разрушенными или дискретизированными породами. Например, при моделировании зоны разрушенных пород (ЗРП) или искусственных охранных сооружений из рядовой породы.

В этом случае использование упругой линейной модели, априори заложенной в МКЭ, когда напряжения пропорциональны деформациям, а поведение материала описывается законом Гука, не является корректным. Энергетическая теория прочности, широко применяемая для металлов, также не подходит для горных пород.

В механике грунтов и строительной механике для материалов с хрупким разрушением рекомендуется использовать критерий, предложенный Кулоном, совпадающий с условием пластичности Треска:

$$|\sigma_i - \sigma_j| = 2c,$$

где  $i \neq j$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ ;

$\sigma_{1,2,3}$  - главные напряжения, МПа;

$c$  – const.

Разрушение, согласно этому условию происходит при достижении максимальными касательными напряжениями некоторой физической константы пород  $c$ . Эта закономерность известна также как теория прочности Кулона-Мора:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $c$  – сцепление, количественно равное пределу прочности среды на срез при отсутствии нормальных напряжений, МПа;

$\varphi$  - угол внутреннего трения, град.

Применительно к дискретным несвязным средам коэффициент сцепления равен нулю, и выражение (1) показывает, что разрушение (движение) сыпучих сред произойдет, когда максимальное касательное напряжение в данном месте выйдет за огибающую кругов Мора [1].

Для описания связи между напряжениями и деформациями в сыпучих средах используют модуль структурной деформации  $E_i$ , и коэффициент Пуассона  $\mu$

$$E_i = \xi_i / e_i,$$

где  $\xi_i$  - коэффициент бокового давления;

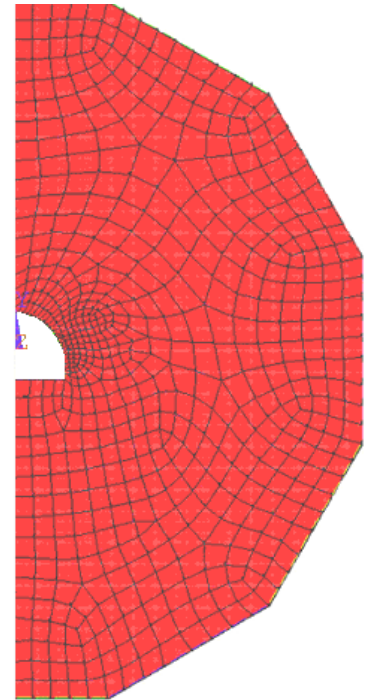
$e_i$  - относительная деформация.

На наш взгляд, учет при математическом моделировании разрушенных пород закона Кулона-Мора позволит получить более достоверные результаты.

Для проверки верности приведенных выше соображений авторами было проведено математическое моделирование процессов выдавливания пород почвы в подготовительной выработке. При этом в качестве эталона были приняты результаты экспериментов на структурных моделях проведенных в лабораторных условиях [2]. Моделирование проводилось в масштабе 1:30. Согласно постановке задачи моделировалась зона разрушенных пород вокруг подготовительной выработки при столбовой системе разработки. Зона разрушения имитировалась породой с размером фракции 0,003-0,01м. Крепь выработки имела арочную форму и была жестко закреплена. Приложением нагрузки по контуру зоны разрушения имитировалось опорное давление от приближающейся лавы. Нагрузку прилагали пошагово и измеряли смещения со стороны почвы. Общий вид модели приведен на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 – Общий вид модели  
а – лабораторное моделирование,  
б – моделирование с помощью МКЭ

Исходные данные для математического моделирования были получены путем лабораторных испытаний пород, закладываемых в структурную модель. Следует отметить, что конечной целью было не столько получение неких абсолютных значений смещений пород почвы в натуральных условиях, сколько обоснование возможности математического описания деформационных процессов в разрушенных породах при помощи МКЭ.

Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. Задача решалась в объемной постановке. В силу осесимметричности задачи моделировалась половина сечения вдоль вертикальной оси.

Результаты моделирования в графическом виде приведены ниже. На рис. 2 приведена картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, а на рис. 3 картина вертикальных смещений при нагрузке равной 0,2МПа. Из рис. 2 видно, что напряжения в породах в пределах ЗРП примерно одинаковые. Это можно объяснить перемещением и уплотнением пород внутри зоны. Так как моделировалась жесткая крепь, по контуру выработки образуется зона повышенных напряжений. Максимальные напряжения наблюдались в углах выработки. В почве выработки была зона разгрузки размером около половины ширины выработки.

Из рис. 3 видно, что вертикальные смещения почвы выработки превосходят по величине перемещения на контуре ЗРП, что соответствует результатам проведенных лабораторных исследований.

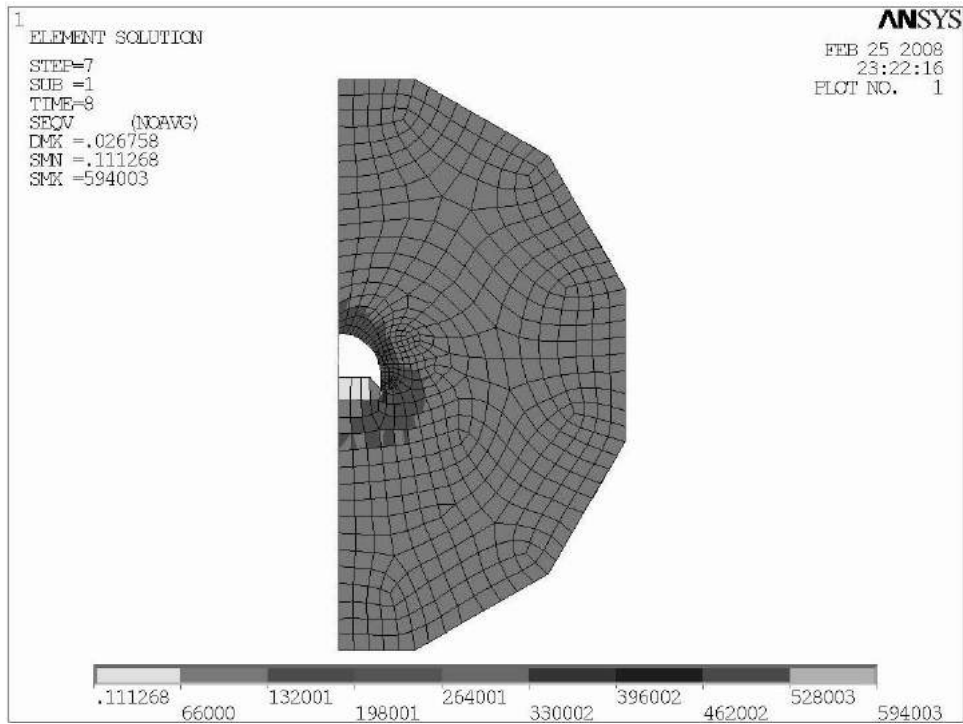


Рис. 2 – Картина распределения в модели эквивалентных напряжений по Мизесу

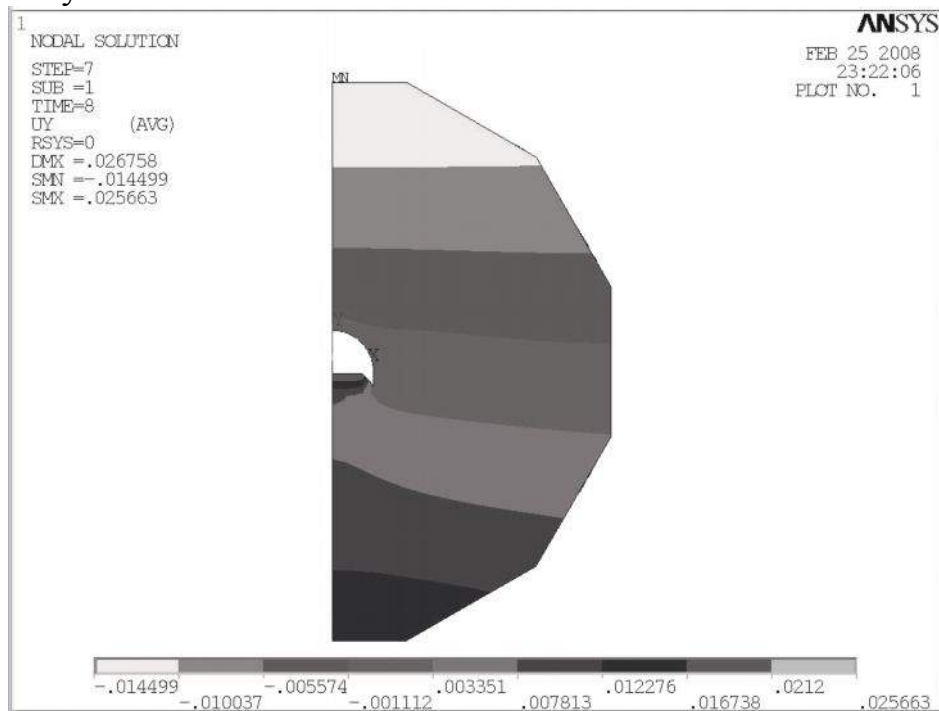


Рис. 3 – Распределение вертикальных смещений в модели

На рис. 4 приведены графики зависимости смещений пород в полость выработки от нагрузки по контуру разрушенных пород для лабораторного (1), и математического (2, 3) моделирования. При этом кривая 2 характеризует смещения почвы выработки в случае учета в модели критерия Кулона-Мора, а кривая – 3 без учета этого критерия.

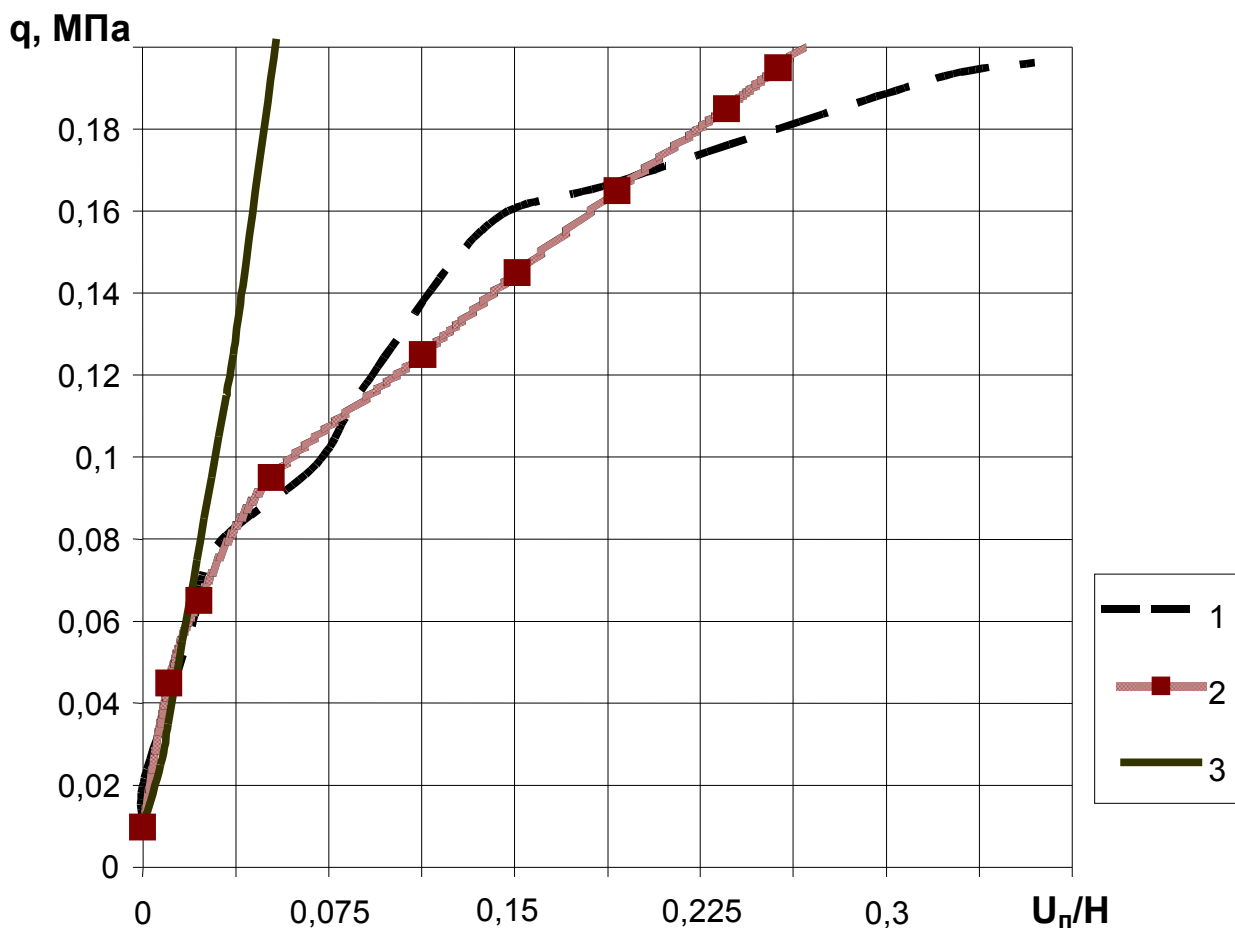


Рис. 4 – Графики зависимости смещений пород почвы выработки от нагрузки по контуру зоны разрушенных пород при: 1 – лабораторном моделировании, 2 – математическом моделировании с учетом теории прочности Кулона-Мора, 3 – математическом моделировании согласно теории упругости

Анализ графиков показывает, что решение задачи в упругой постановке корректно при смещениях почвы до 1,8% от высоты выработки. Дальнейшее решение должно учитывать изменение закона деформирования. Учет в расчетной модели критерия Кулона-Мора позволяет более качественно описать деформационные процессы в разрушенных породах.

На основании проведенных исследований можно сделать **вывод**, что при наличии исходных данных с помощью МКЭ с большой достоверностью можно моделировать разрушенные породы и сыпучие тела.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Л.В. Ершов, Л.К. Либерман, И.Б. Нейман "Механика горных пород" – М.: Недра, 1987. – 192с.
2. Касьян Н.Н., Негрей С.Г., Сахно И.Г. О влиянии механического отпора выдавливанию пород почвы горных выработок на их смещения // Разработка рудных месторождений. – 2004.– Вып. 87. – С. 28-29.