

УДК 622.831.3

*Н.Н. Касьян, д.н.т., проф., зав. каф. МРПИ, И.Г. Сахно, к.т.н., доц.,  
С.Г. Негрей, к.т.н., доц., каф. МРПИ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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. 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].

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 процесса выдавливания дискретизированных пород почвы в полость выработки, обусловленного нарушением равновесного состояния системы «крепь– зона разрушенных пород– окружающий породный массив» в результате проведения подрывки почвы без применения и с применением механического отпора этому процессу.

При этом в качестве эталона были приняты результаты экспериментов на структурных моделях (рис. 1), проведенных в лабораторных условиях [2].

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 (рис. 1).

На рисунке 2 приведена картина распределения эквивалентных напряжений рассчитанных по энергетической при нагрузке по контуру равной 0,2 МПа, при отсутствии отпора по почве (а) и при отпоре 3 кПа (б).

При этом напряжения внутри ЗРП в первом и втором случаях одинаковые. Различие только в напряжениях, возникающих вокруг выработки на расстоянии 25-75% от ее ширины. Это можно объяснить перемещением и уплотнением пород внутри зоны, так как моделировалась жесткая крепь, по контуру выработки образуется область повышенных напряжений. Максимальные напряжения наблюдались в углах выработки. В почве выработки была зона разгрузки размером около 50 % от ширины выработки в случае без отпора, и около 25% – при отпоре.

В результате математического и структурного моделирования при различных величинах пригрузки по периметру зоны разрушенных пород была получена количественная зависимость величины выдавливания разрушенных пород почвы в полость выработки от величины механического отпора этому процессу (рис. 3).

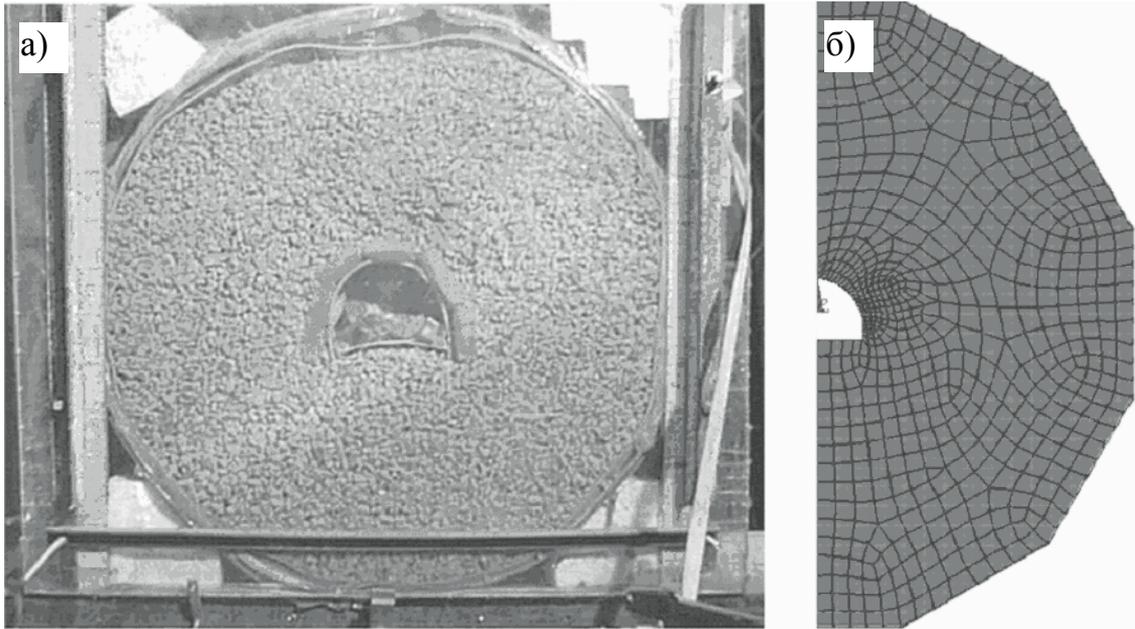


Рис. 1. Общий вид модели: а– лабораторное моделирование, б– моделирование с помощью МКЭ

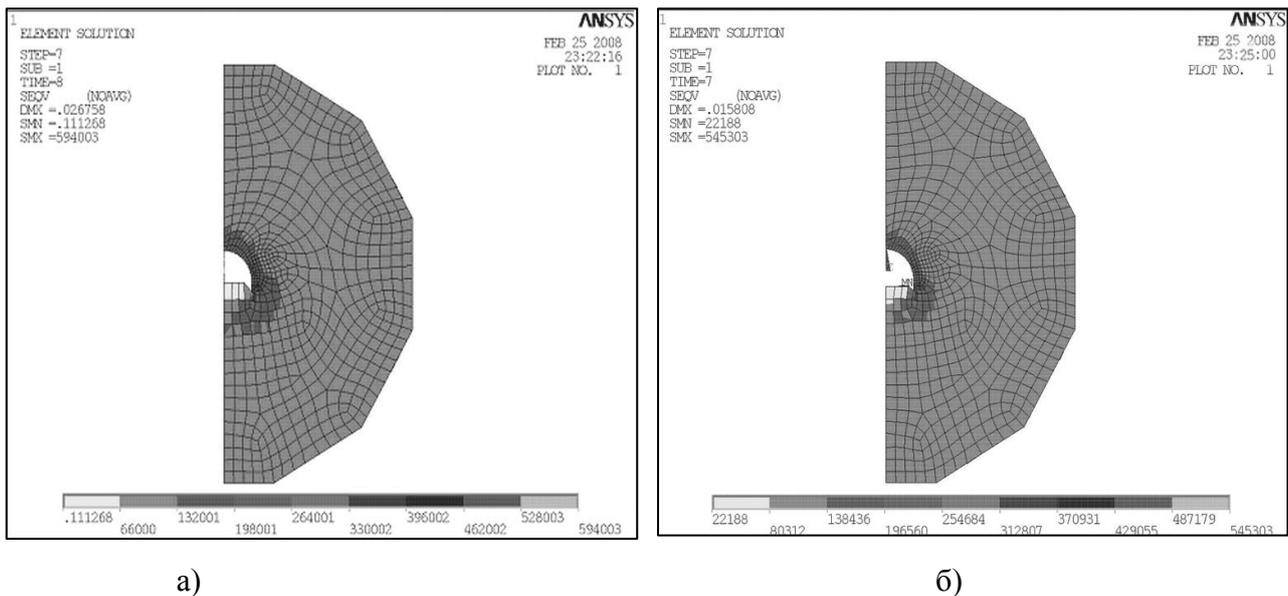


Рис. 2. Картина распределения в модели эквивалентных напряжений, рассчитанных по энергетической теории: а– без отпора по почве выработки, б– с отпором 3 кПа

Из полученной зависимости следует, что с увеличением отпора, прикладываемого к почве выработки, уменьшается величина ее смещений, причем значение механического отпора на два-три порядка меньше сил, действующих по периметру зоны разрушенных пород.

Из рисунка 3 видно, что линии регрессии, построенные по результатам структурного и математического моделирования, имеют одинаковый характер. Учитывая достаточную сходимость результатов можно сделать вывод о том, что математическое моделирование позволяет достаточно точно описать деформационные процессы в дискретной среде.

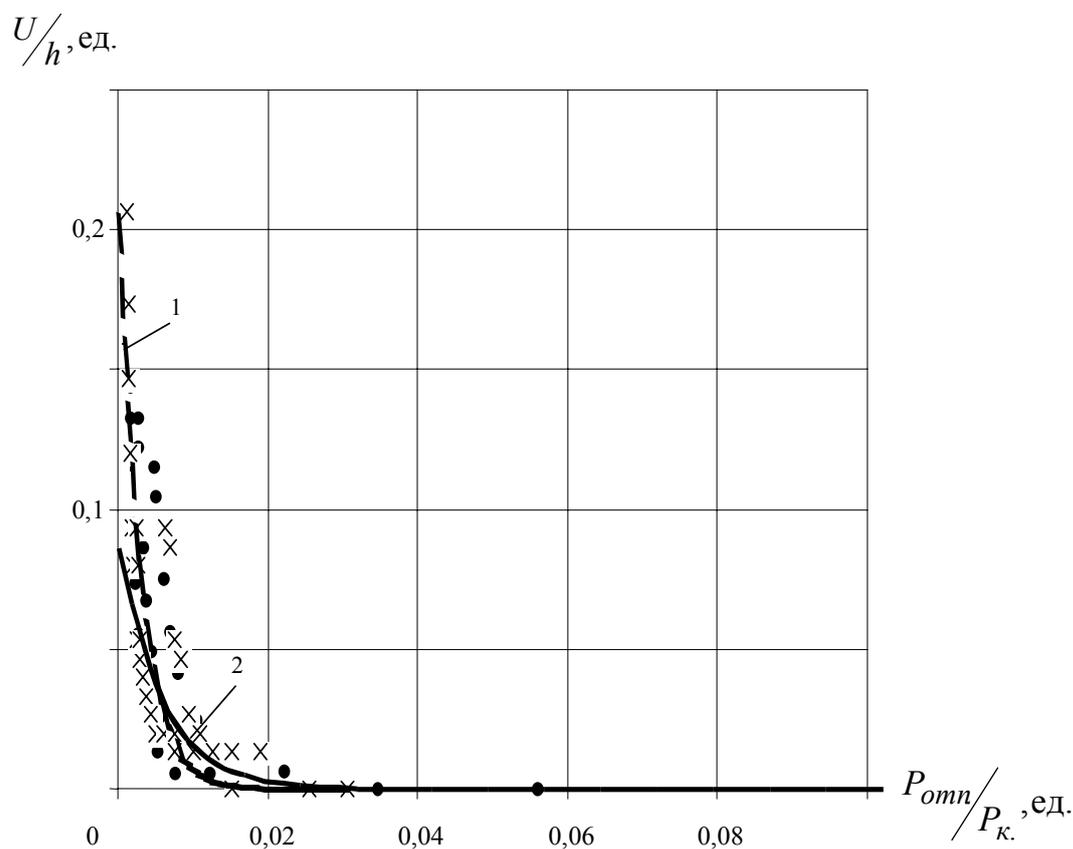


Рис. 3. Графики зависимости  $U/h$  от  $P_{омн.}/P_{к.}$  полученные по результатам структурного (1) и математического (2) моделирования

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что учет в расчетной модели критерия Кулона-Мора позволяет более качественно описать деформационные процессы в разрушенных породах и при наличии исходных данных с помощью МКЭ с большой достоверностью можно моделировать разрушенные породы и сыпучие тела.

#### Библиографический список

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