

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

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

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

The analysis of the intense-deformed condition of the destroyed rocks in view of criterion Mohr-Kulon is lead by a method of final elements.

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 равно пределу прочности среды на срез при отсутствии нормальных напряжений, МПа; φ - угол внутреннего трения, град.

Применительно к дискретным несвязным средам, коэффициент сцепления ра-

вен 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 μ

$$E_i = \xi_i / e_i ,$$

где ξ_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 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, проведенных в лабораторных условиях.

Целью лабораторных исследований на структурных моделях было установление влияния механического отпора выдавливанию пород почвы горных выработок на характер их смещения в процессе формирования зоны разрушенных пород вокруг выработки.

Модель (рис. 1) с масштабом моделирования 1:30, представляла собой сварную металлическую конструкцию (1) со швеллера [60 размерами 0,72×0,52м, к которой крепилась задняя (2) и прозрачная передняя (3) стенки.

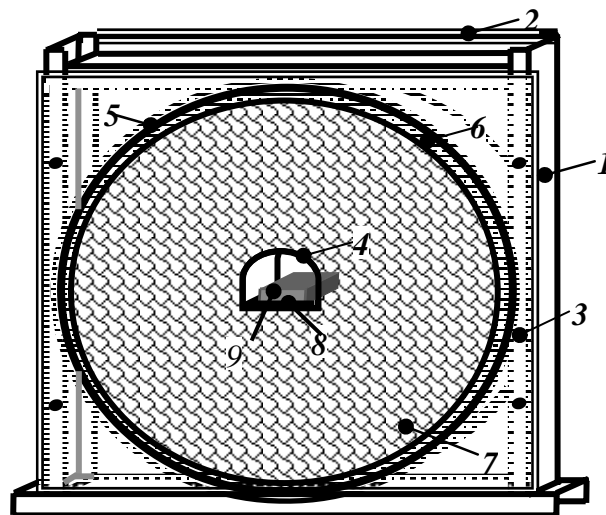


Рис. 1. Общий вид модели

Внутри конструкции размещался макет выработки арочного сечения (4) размерами 0,1×0,15 м, а также металлическая полоса (5), выгнутая в виде круга, шириной равной толщине модели. Эта полоса устанавливалась как ограничитель, определяющий границу зоны разрушенных пород вокруг выработки. Выработка и ограничитель жестко крепились к каркасу и задней стенке модели. По периметру ограничителя, для имитации давления на внешней границе ЗРП, устанавливалась пневмокамера (6). В рабочую полость модели помещался объем породы (7) с размером фракции 0,003-0,01м. На почве выработки для обеспечения равномерной пригрузки по ее поверхности размещалась деревянная пластина (8), на которую устанавливался груз (9).

Было отработано несколько моделей при различных величинах пригрузки по почве выработки (от 0 до 0,65 кПа).

Отработка каждой модели производилась поэтапно (с постепенным увеличением пригрузки по периметру зоны разрушенных пород, давление от которой изменялось от 0 до 235,4 кПа) с фиксацией величины смещения пород почвы после каждого этапа.

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. 2).

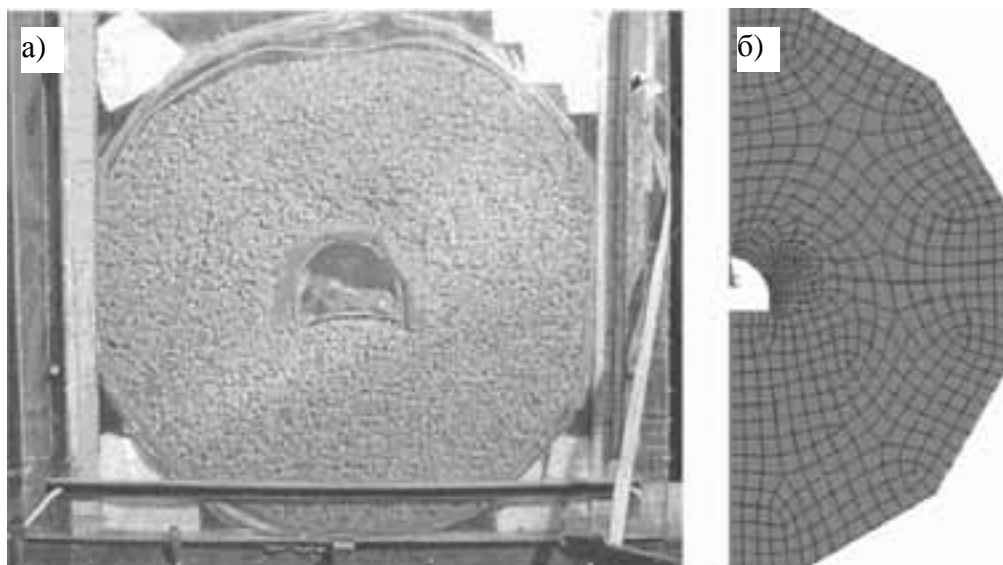


Рис. 2. Общий вид модели: а– лабораторное моделирование, б– моделирование с помощью МКЭ

Результаты моделирования в графическом виде представлены ниже (рис.3). На рисунке 3 приведена картина распределения эквивалентных напряжений рассчитанных по энергетической теории, а на

рисунке 4 картина вертикальных смещений при нагрузке по контуру равной 0,2 МПа, при отсутствии отпора по почве (а) и при отпоре 3 кПа (б).

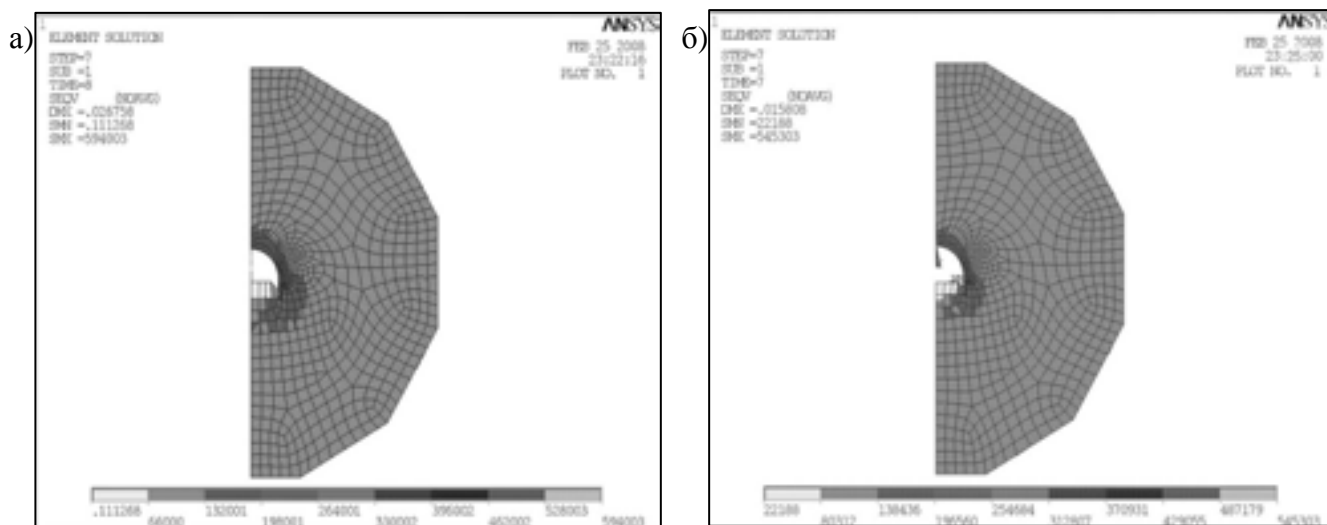


Рис. 3. Картина распределения в модели эквивалентных напряжений, рассчитанных по энергетической теории: а– без отпора по почве выработки, б– с отпором 3 кПа

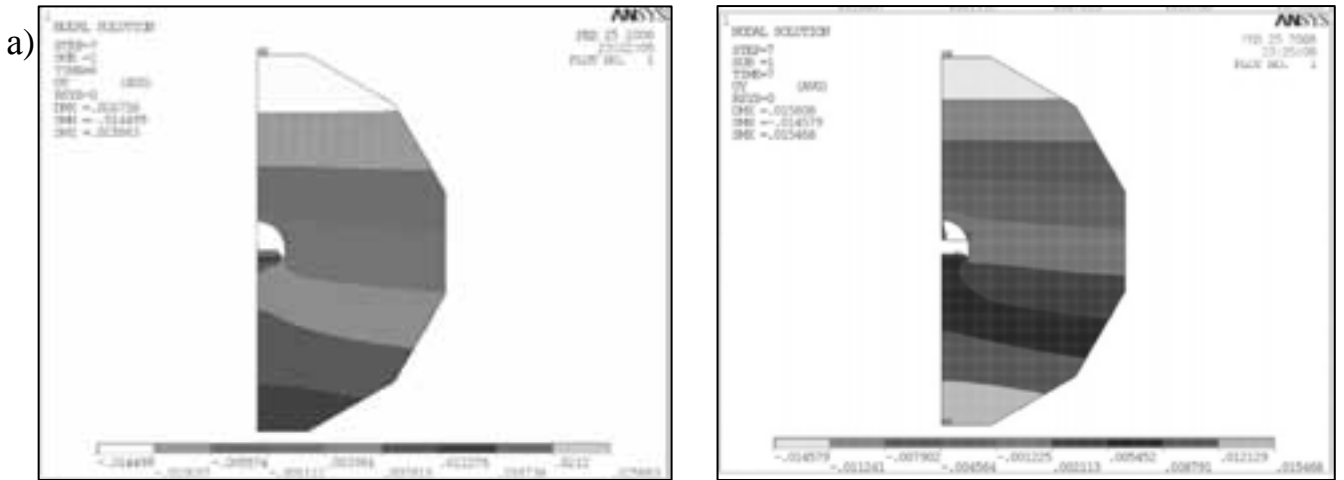


Рис. 4. Распределение вертикальных смещений в модели: а– без отпора по почве выработки, б– с отпором 3 кПа

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.

Из рисунка 4а видно, что вертикальные смещения почвы выработки превосходят по величине перемещения на контуре ЗРП, что соответствует результатам проведенных лабораторных исследований.

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. 5).

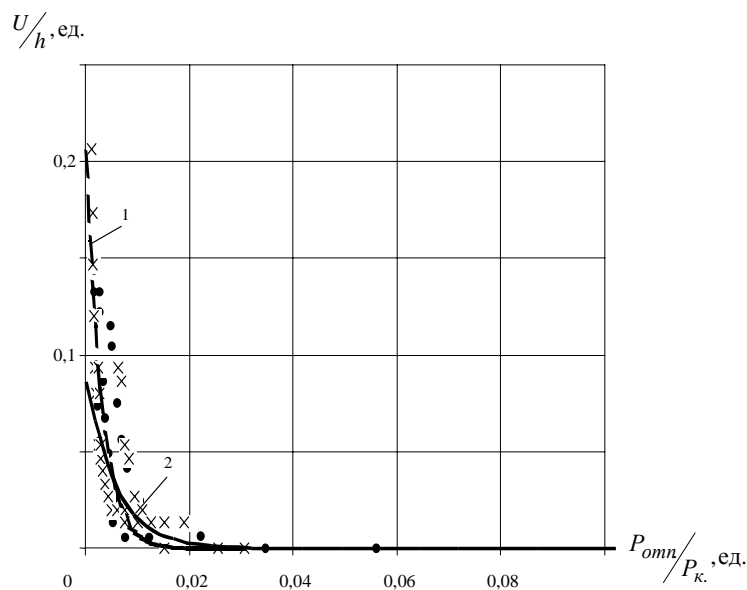


Рис. 5. Графики зависимости U/h от $P_{omn.}/P_k$ (где U – величина смещений контура почвы выработки; h – высота выработки; $P_{omn.}$ – величина механического отпора выдавливанию пород; P_k – величина пригрузки по контуру зоны разрушенных пород), полученные по результатам структурного (1) и математического (2) моделирования

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 5 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.

При использовании традиционного подхода к расчету методом конечных элементов (с применением законов теории упругости), его результаты будут существенно отличаться от лабораторных, что видно из рисунка 6.

Анализ графиков показывает, что решение задачи в упругой постановке корректно при смещениях почвы до 1,8% от высоты выработки, а дальнейшее решение должно учитывать изменение закона деформирования.

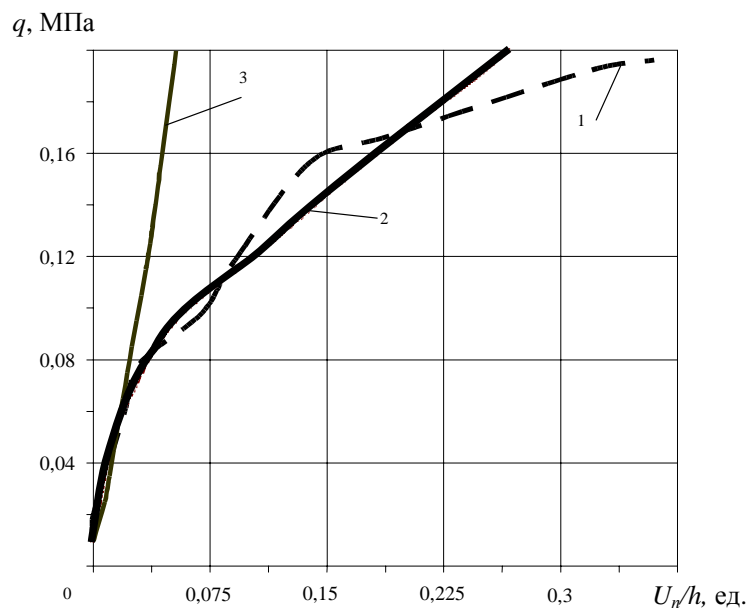


Рис. 6. Графики зависимости смещений пород почвы выработки от нагрузки по контуру зоны разрушенных пород при: 1– лабораторном моделировании, 2,3– математическом моделировании, соответственно, с учетом критерия Кулона-Мора и согласно теории упругости

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.

Список литературы

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 выдавливанию пород почвы горных выработок на их смещения // Разработка рудных месторождений. – 2004.– Вып. 87. – С. 28-29.

Рекомендовано до публікації