

УДК 622.831

Старотиторов И.Ю., асп., НГУ, г. Днепропетровск, Украина

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Общие положения. Оценка прочности твердых тел в объемном напряженном состоянии может быть выполнена на основе той или иной теории прочности [1, 2, 3]. В механике горных пород наибольшее распространение получила теория прочности О. Мора, которая полностью базируется на экспериментальных данных, и ее модификации [1].

Имея хорошо обоснованное условие прочности, можно изучать процесс разрушения горных пород на численных моделях. Такие модели исследуются при помощи программных комплексов, в основе которых лежит один из численных методов. Как правило, это метод конечных элементов (МКЭ) [4].

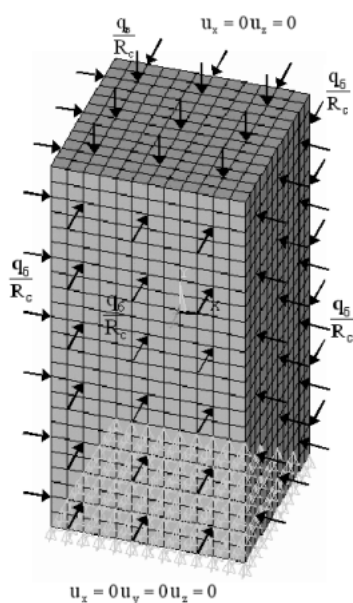


Рис. 1. Конечно-элементная модель породного образца

Методика испытания численной модели. Для изучения прочностных характеристик горных пород в объемном напряженном состоянии была разработана объемная конечно-элементная модель породного образца (рис. 1). Образец полагался изотропным, однородным и линейно-упругим. Его размеры – 50x50x100 мм.

На численной модели по определенной методике имитировался процесс разрушения породного образца в условиях трехосного сжатия при следующем соотношении компонентов главных напряжений: Такое соотношение имитируется в процессе нагружения и разрушения породного образца в приборе Кармана [1].

В процессе исследований к верхней и боковым граням модели прикладывалась распределенная нагрузка, которая для упрощения расчетов задавалась в долях от предполагаемого предела прочности материала образца на одноосное сжатие. На каждом этапе нагружения выполнялась оценка напряженно-деформированного состояния образца в соответствии с принятой теорией прочности и определялся уровень разрушающей нагрузки, вызывающей переход материала образца в стадию неупругого деформирования.

Полагалось, что модель разрушится в том случае, когда во всех элементах конечно-элементной сетки выполнится условие:

$$\frac{\sigma_e}{R_c} \geq 1.$$

Здесь σ_e – эквивалентные напряжения, действующие в точке массива; R_c – предел прочности пород на одноосное сжатие.

Для вычисления эквивалентного напряжения в данной работе использовались критерий прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко [1]

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c \quad (1)$$

и критерий прочности П.П. Баландина [2]

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 2\psi((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}}{2\psi} \leq R_c \quad (2)$$

где $\psi = \frac{R_p}{R_c}$ – коэффициент хрупкости горных пород ($\psi = 1$ – соответствует понятию идеальной пластичности, $\psi = 0$ – идеальной хрупкости); R_p – предел прочности на растяжение; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Как видно из приведенных выше выражений, первый критерий учитывает только два компонента главных напряжений (наибольшее и наименьшее), в то время как во втором присутствуют все три главных напряжения.

Анализ полученных результатов. По описанной выше методике были выполнены испытания численной модели породного образца при различных значениях безразмерной нагрузки, действующей на ее боковые грани $\frac{q_0}{R_c}$, величина которой варьировалась в диапазоне от 0 до 0,8 с шагом 0,1.

на которой варьировалась в диапазоне от 0 до 0,8 с шагом 0,1.

В результате проведенных испытаний для каждого критерия были получены значения максимальных и минимальных главных напряжений, по которым были построены предельные круги Мора и огибающие к ним для хрупких горных пород с коэффициентом $\psi = 0,1$ (рис. 2). Полученные кривые сравнивались с экспериментальными кривыми, построенными для аргиллита, алевролита и песчаника. Данные для построения экспериментальных кривых были взяты у А.Н. Ставрогина, который получил их в результате лабораторных испытаний породных образцов [5].

Как видно из рисунка, кривые, соответствующие критериям прочности, в целом, расположились немного ниже экспериментальных. Это говорит о том,

что оба критерия позволяют прогнозировать прочность хрупких горных пород с некоторым заранее заложенным в структуре формул запасом прочности. При этом критерий прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко является более удобным в аналитических расчетах при решении плоских задач геомеханики, поскольку он симметричен по отношению к компонентам напряжений. Для решения же объемных задач следует использовать критерий прочности П.П. Баландина.

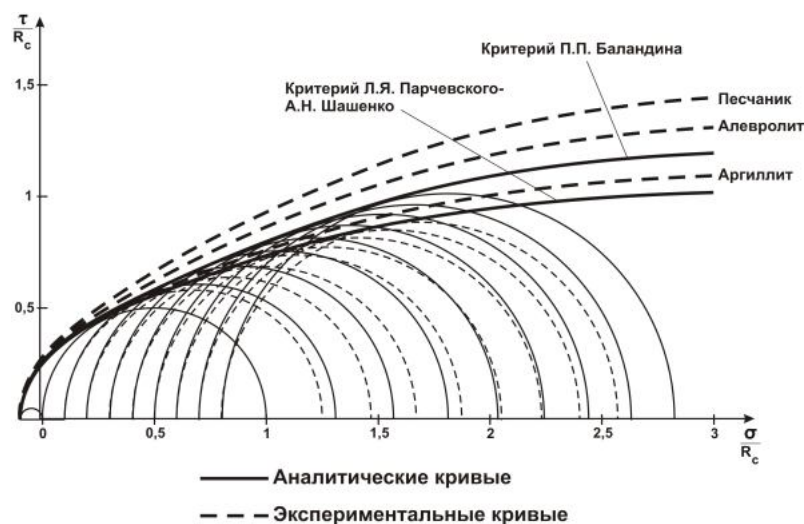


Рис. 2. Огибающие кругов Мора, построенные по аналитическим (1), (2) и экспериментальным данным [5]

По этой же методике был выполнен ряд дополнительных испытаний численной модели, но уже для крайних случаев, т.е. для идеально хрупких и идеально пластичных горных пород. Условия прочности (1) и (2) для этих случаев соответственно имеют следующие выражения:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \leq R_c \text{ when } \psi = 0; \quad (3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq R_c \text{ when } \psi = 1. \quad (4)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + 2\sigma_3)} \leq R_c \text{ when } \psi = 0; \quad (5)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq R_c \text{ when } \psi = 1. \quad (6)$$

Полученные результаты численного моделирования (а именно значения максимальных и минимальных главных напряжений) были сопоставлены с известными аналитическими и экспериментальными данными (рис. 3). В качестве последних использованы результаты лабораторных испытаний горных пород, полученные А.Н. Ставрогиным [5].

Как следует из рисунка, результаты численного моделирования процесса разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии достаточно хо-

рошо совпадают с результатами аналитических и экспериментальных исследований.

Таким образом, исследуемая численная модель адекватно отражает явление разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии, а сам метод вполне может быть использован при решении задач геомеханики.

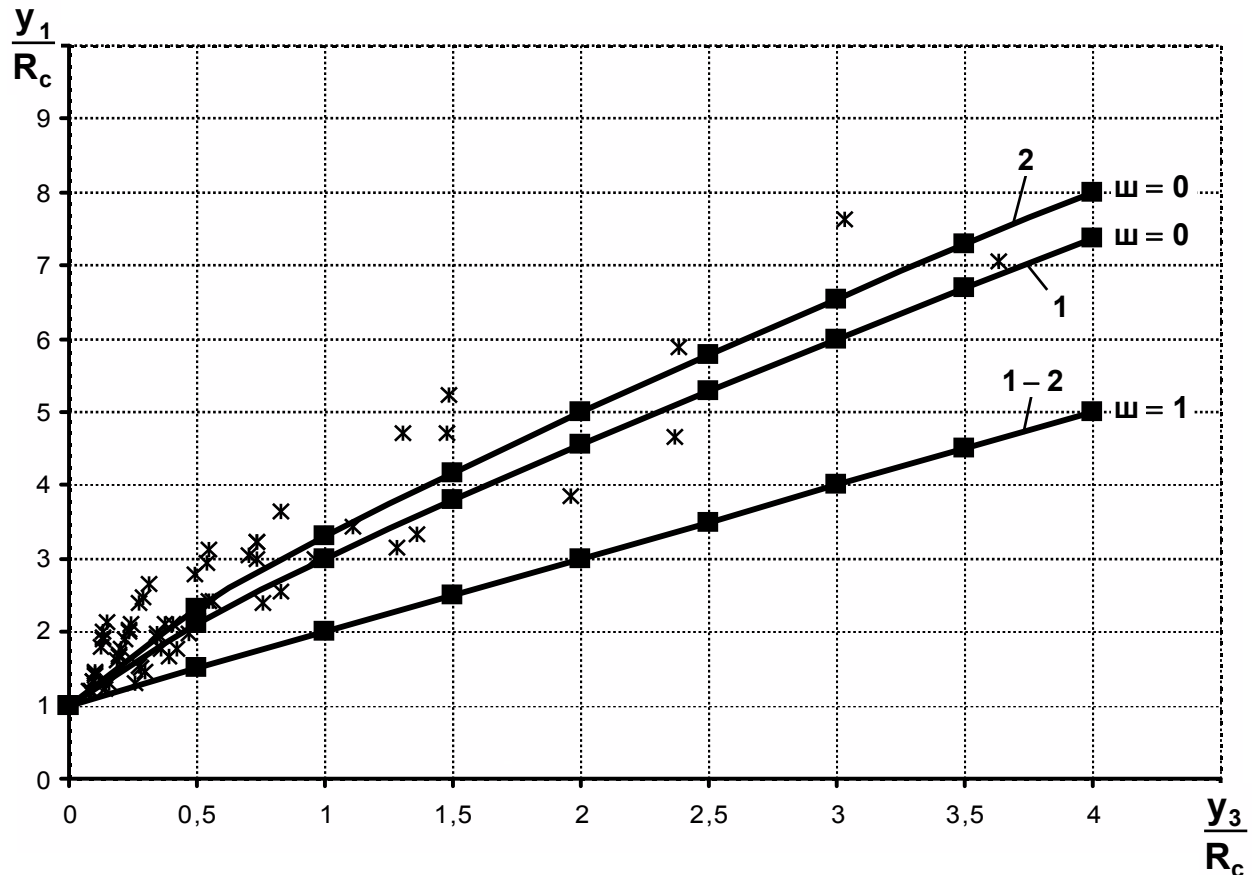


Рис. 3. Сравнение результатов численного моделирования (■) с аналитическими (3), (4), (5), (6) и экспериментальными [5] данными: 1 – критерий Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко; 2 – критерий П.П. Баландина

ВЫВОДЫ

1. Выполнено численное моделирование процесса разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии используя аналитические критерии прочности Л.Я. Парчевского – А.Н. Шашенко и П.П. Баландина. Причем, если первый критерий получен в предположении, что прочность горных пород зависит, прежде всего, от соотношения между наибольшим и наименьшим главными напряжениями, то второй учитывает все три компонента главных напряжений.

2. Разработанная численная модель позволила достаточно хорошо описать процесс разрушения горных пород в объемном напряженном состоянии и при этом полученные результаты численного моделирования показали неплохую сходимость с аналитическими и экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород: Учебник для вузов. – К.: Новый друк, 2003. – 400 с.
2. Расчеты на прочность в машиностроении/ Пономарев С.Д., Бидерман В.Л. и др. – Москва: МАШГИЗ, 1956. Том I. – 884 с.
3. Дидык Р.П., Кузнецов Е.В., Забара В.Н. Физические основы прочности. Учебник. – Д.: Наука и образование, 2005. – 608 с.
4. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
5. Ставрогин А. Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.

УДК 622.258

*Прокопов А.Ю., Склепчук В.Л., Тимофеев Д.Н.,
Шахтинский институт ЮРГТУ(НПИ)*

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА «УДАЧНЫЙ»
В ЗОНЕ НЕФТЕГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ**

Кимберлитовая трубка «Удачная» находится на площади Далдынского кимберлитового поля в северной части Далдынского-Алакитского алмазонасного района. Разработка верхних горизонтов месторождения осуществляется открытым способом с 1973 г. Проектная глубина карьера составляет 600 м (абс. отм. дна -290 м). К настоящему времени карьером вскрыт горизонт -170 м, а глубина достигает 470-520 м. С целью дальнейшей разработки месторождения подземным способом был разработан проект строительства подземного рудника «Удачный», предусматривающий схему вскрытия тремя вертикальными стволами: скиповым, клетевым и вентиляционно-вспомогательным глубиной соответственно 1046, 959 и 997,5 м.

Вентиляционно-вспомогательный ствол диаметром в свету 8 м оборудуется 2 грузовыми клетями 31НВ-4,5А грузоподъемностью 13,5 т (на 30 человек) и противовесами и предназначен для подачи свежего воздуха, спуска-подъема отдельных грузов, материалов и аварийного выхода для людей, а также обслуживания подземного комплекса дробления.

Проходка ствола осуществлялась буровзрывным способом по совмещенной схеме с использованием металлического проходческого копра «Север», пере-