

УДК [622.261 — 1123:622.281]:519.25

О.О. Сдвижкова, Д.В. Бабец

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА СМЕЩЕНИЙ ПРОТЯЖЕННОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Приведена методика учета вариации физико-механических характеристик в геомеханических расчетах. Обобщены результаты вычислительных экспериментов, касающихся влияния вариации деформационных и прочностных свойств горных пород на смещения контура выработки.

Ключевые слова: математическое моделирование зоны разрушения, неоднородность горных пород.

Семинар № 13

Естественным свойством горных пород является их неоднородность, которая проявляется на различных уровнях. При решении задач механики горных пород, как правило, разброс значений физико-механических характеристик учитывается путем их усреднения, или выбора наименьшего значения из наблюдаемых, или же введением поправочных коэффициентов [1]. При этом никак не оценивается степень изменчивости свойств горных пород, которая существенна даже в пределах одной литологической разности и является следствием естественной неоднородности породной среды. Например, обработка статистических данных, приведенных в [2], об изменчивости таких характеристик как модуль упругости (E), коэффициент Пуассона (v), предел прочности на одноосное сжатие (R_c), показывает, что разброс значений деформационных и прочностных характеристик некоторых осадочных пород довольно существенен, коэффициент вариации η достигает 30–70 %. Очевидно, что такой большой разброс значений физико-механических характеристик не может не

влиять на напряженно-деформированное состояние пород вокруг выработок.

Постановка задачи

Наиболее важными характеристиками напряженно деформированного состояния, т.е. по сути, показателями устойчивости выработки, являются смещения породного обнажения и размер зоны разрушения, которая образуется вокруг выработки вследствие переконцентрации напряжений. Под этой зоной понимается область массива, в которой породы перешли в новое качественное состояние, отличное от упругого. В зависимости от типа пород в этой области реализуется либо хрупкое разрушение, либо необратимые пластические деформации. Эту область принято называть зоной неупругих деформаций, и по сложившимся в последние годы представлениям полагают, что именно вес пород, заключенный в этой зоне, создает нагрузку на крепь выработки, а размер зоны неупругих деформаций и степень разрушения пород внутри нее определяет величину смещений контура выработки. С точки зрения математического моде-

лирования зоны разрушения под ней понимается совокупность точек, в которых выполняются некоторые предельные соотношения между действующими в этой точке напряжениями и механическими характеристиками материала. В частности, в НГУ разработан и хорошо апробирован критерий прочности (Л.Я. Парчевский и А.Н. Шашенко), в соответствии с которым, предельное состояние материала в точке определяется уравнением [3]:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 - R_c^2\psi - (1 - \psi)R_c(\sigma_x + \sigma_y) \geq 0 \quad (1)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений, $\psi = R_p / R_c$, R_p, R_c – соответственно пределы прочности на одноосное растяжение и сжатие.

Таким образом, под зоной разрушения понимают множество точек, в которых выполняется условие (1). Деформирование материала в дальнейшем происходит за пределом прочности и сопровождается пластическим разупрочнением и разрыхлением. Физические соотношения между напряжениями и деформациями на этой стадии определяются ниспадающей ветвью диаграммы сжатия $\sigma - \varepsilon$. Для выработки кругового очертания размер зоны разрушения характеризуют приведенным радиусом

$r_L = \frac{R_L}{R}$, где R – радиус выработки, R_L – размер зоны разрушения. Нагрузка на крепь выработки определяется как вес пород в пределах зоны разрушения.

$$P = R\gamma(r_L - 1),$$

где γ – объемный вес пород.

Сама по себе задача определения расчетным путем размера зоны раз-

рушения и величины смещений контура выработки является очень сложной задачей механики и обычно требует существенной идеализации объекта (представление породного массива однородной и изотропной средой, форму выработки – круглой и др.) Неоднородность горных пород, проявляющаяся в стохастическом разбросе их свойств, безусловно, оказывает влияние и на размер зоны разрушения и на величину смещений контура выработки. Но учесть эту неоднородность в расчетах до не давнего времени не представлялось возможным. Однако с развитием вычислительных средств и адаптированных к ним численных методов механики твердого тела появляется возможность моделирования различных неоднородностей породной среды, в том числе и стохастического разброса ее свойств.

Одним из наиболее эффективных методов расчета напряженно-деформированного состояния породного массива является метод конечных элементов, который позволяет для каждой локальной области среды задать набор физико-механических характеристик, отличных от характеристик соседних областей (конечных элементов, на которые условно разделена исследуемая область). В результате расчетов определяют напряжения, деформации и перемещения в пределах каждого конечного элемента.

Идея данной методики заключается в том, что физико-механические характеристики горных пород, то есть исходные данные к расчету, полагаются случайными величинами. Их значения внутри каждого конечного элемента реализуются с той или иной вероятностью.

Значения механических характеристик для каждой локальной области (это может быть группа конечных

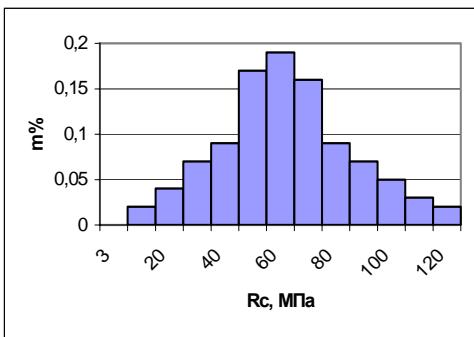


Рис. 1. Гистограмма значений предела прочности на одноосное сжатие (алевролит)

элементов) генерируют датчиком случайных чисел. Генерация осуществляется в соответствии с законом распределения вероятностей, который устанавливается при анализе данных испытаний горных пород по стандартным методикам. Например, на рис. 1 показана гистограмма распределения прочности образцов алевролита на одноосное сжатие. Анализ вида гистограммы, характеристики асимметрии и островершинности, проверка по критерию согласия показали, что эмпирические данные не противоречат нормальному закону распределения. Вариация значений прочности составила 35,6 %. Следовательно, при определении напряжений и перемещений в слое алевролита, слагающего, например, кровлю выработки, нужно генерировать значения предела прочности по нормальному закону с вариацией, равной 35,6 %. Отметим, однако, что на величину вариации и вид закона распределения существенное влияние оказывает трещиноватость породного массива. Подробно этот вопрос рассмотрен в монографии [4]. Там же приведена методика расчета статистических характеристик с учетом интенсивности трещин.

Таким образом, для определения напряженно-деформированного состояния неоднородного породного массива в окрестности выработки с учетом изменчивости его свойств, следует выполнить следующие этапы работ:

- 1) по данным стандартных испытаний образцов получить статистические оценки основных физико-механических свойств горных пород;
- 2) уточнить эти оценки с учетом наличия трещин;
- 3) используя уточненные моменты распределения, подобрать для каждого из свойств соответствующий закон распределения;
- 4) включить в алгоритм метода конечных элементов процедуру генерации случайных чисел датчиком случайных чисел в соответствии с установленными законами распределения;
- 5) выполнить расчеты МКЭ, используя в качестве исходных данных случайные значения физико-механических свойств. Решение должно выполняться в упруго-пластической постановке с учетом разупрочнения пород при деформировании за пределом прочности.

Расчет статистических характеристик с учетом интенсивности трещин

Значения физико-механических свойств определяются на основе стандартных испытаний образцов горных пород [1]. Для каждой характеристики X получают n результатов наблюдений, по которым определяются эмпирические начальные моменты распределения k -го порядка

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k. \quad (2)$$

В [4] показано, что все начальные моменты k -го порядка для трещинова-

той среды m'_k и нетрещиноватой m_k связаны соотношением:

$$m'_k = K m_k, \quad (3)$$

где K — коэффициент учета трещин:

$$K = \frac{l_m}{l_m + l_0}. \quad (4)$$

Здесь l_m — расстояние между трещинами, l_0 — размер стандартных образцов, участвующих в испытаниях.

С начальными моментами связаны центральные моменты, которые необходимы для вычисления дисперсии коэффициента вариации, асимметрии и острорешинности распределения [5].

С учетом (3) для трещиноватой среды определяются следующие характеристики выборки [4]:

1) среднее (начальный момент первого порядка)

$$m'_1 = K m_1 = K \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

2) дисперсия (центральный момент второго порядка)

$$D' = \mu'_2 = K m_2 - K^2 m_1^2;$$

3) относительная вариация

$$\eta = \frac{D'}{m'_1};$$

4) центральный момент 3-го порядка

$$\begin{aligned} \mu'_3 &= K_3 m_3 - 3 K_1 K_2 m_2 m_1 + \\ &+ 2 K_1^3 m_1^3; \end{aligned}$$

5) центральный момент 4-го порядка

$$\begin{aligned} \mu'_4 &= K_4 m_4 - 4 K_3 K_1 m_3 m_1 + \\ &+ 6 K_2 K_1^2 m_2 m_1^2 - 3 K_1^4 m_1^4; \end{aligned}$$

6) оценка асимметрии

$$\beta_1^2 = \frac{\mu'_3^2}{\mu'_2^3};$$

7) оценка острорешинности

$$\beta_2 = \frac{\mu'_4}{\mu'_2^2}.$$

Среднее, дисперсия и относительная вариация являются исходными данными для генерации случайных значений физико-механических свойств горных пород. Оценки асимметрии и острорешинности необходимы для подбора теоретического распределения для каждого из этих свойств, в соответствии с которым его значения генерируются датчиком случайных чисел.

Выбор закона распределения осуществляется по графику Пирсона, по методу описанному в известной монографии Хана и Шапиро [6].

Генерация случайных значений модуля упругости, коэффициента Пуассона и предела прочности на одноосное сжатие в каждом конечном элементе или в некоторых группах элементов осуществляется с помощью датчика случайных чисел, который включен в алгоритм МКЭ. Датчик реализует рекурсивную процедуру получения случайного числа: задается первое (входное) случайное число, с его помощью датчик генерирует второе число; при повторном обращении к датчику второе число является входным, третье число формируется по такому же алгоритму и т. д. [7, 8].

После выполнения указанных подготовительных операций по вводу исходных данных выполняется расчет напряжений, деформаций и перемещений внутри каждого элемента области в соответствии с ал-

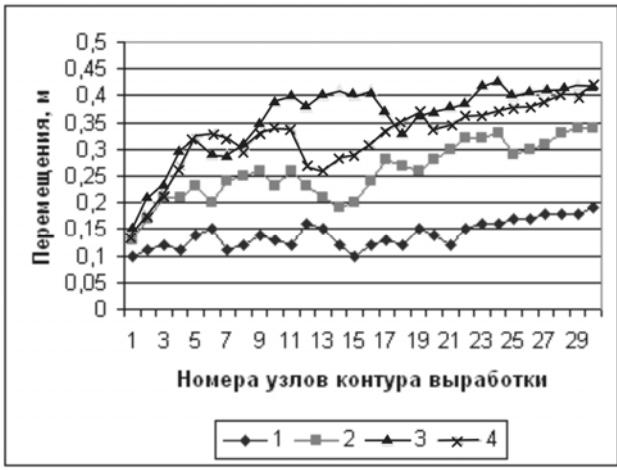


Рис. 2. Перемещения контура выработки с учетом изменчивости деформационных характеристик горных пород:

1 — однородная модель $E = 7000$ МПа, $v = 0,25$, $R_c = 25$ МПа; 2 — E , v , R_c варьировались по нормальному закону с вариацией 30%; 3 — E , v варьировались по равномерному закону с вариацией 60%, R_c — по нормальному закону с вариацией 30%; 4 — стохастическая модель (E и v варьировались по нормальному закону с вариацией 30%, $R_c = \text{const} = 25$ МПа).

горитмом метода конечных элементов [9, 10].

На рис. 2 показано как изменяются смещения контура выработки в зависимости от вариации модуля упругости, коэффициента Пуассона и пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение.

По оси абсцисс откладываются номера узлов на контуре выработки, по оси ординат — перемещения контура, для различных вариантов расчета.

Выполнение большого количества расчетов по указанной методике показало, что учет изменчивости модуля упругости (E), коэффициента Пуассона (v), предела прочности на одноосное сжатие (R_c) приводит к изменению величины максимального смещения контура выработки и максимального размера зоны неупругих деформаций (перпендикулярно напластованию) на 30—40 % в зависимости от вида распределения генерируемых исходных данных и величины их вариации. Для каждого варианта расчетов определялись величина отклонения максимального смещения ΔU в неоднородной среде

де $U_{\text{вак}}^H$ от максимального смещения

$U_{\text{вак}}^O$ в однородной среде:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{вак}}^H - U_{\text{вак}}^O}{U_{\text{вак}}^H} \cdot 100\%, \quad (5)$$

а также аналогичная величина отклонения Δr_L максимального размера зоны неупругих деформаций r_L^H в неоднородной среде от максимального размера r_L^O в однородной среде:

$$\Delta r_L = \frac{r_L^H - r_L^O}{r_L^H} \cdot 100\%. \quad (6)$$

В результате обобщений результатов вычислительного эксперимента получены зависимости указанных отклонений от вариаций исходных данных:

$$\Delta U = 11,34\eta_E + 47,17\eta_{\sigma_{CK}} \frac{R}{h} - 10,26\eta_E\eta_v \quad (7)$$

$$\Delta r_L = 5,27\eta_{\sigma_{CK}} - 0,97\eta_v\eta_{\sigma_p} + 1,65\eta_{\sigma_{CK}} \frac{R}{h}, \quad (8)$$

где $\eta_E, \eta_{\sigma_{ex}}, \eta_p, \eta_v$ — относительные вариации модуля упругости, пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение и коэффициента Пуассона соответственно.

Полученные зависимости позволяют уточнить те механические расчеты, которые выполнены без учета стохастической неоднородности породной среды.

Известен целый ряд аналитических решений задачи об упругопластическом деформировании породного массива вокруг выработки круглой формы (Ю.М. Либермана, И.В. Баклашова, В.В. Виноградова, А.Н. Шашенко), в которых получены замкнутые выражения для смещений контура выработки u_r на основе различных гипотез прочности. Кроме того эта величина может быть определена с помощью МКЭ в традиционной детерминированной постановке с помощью какого-либо стандартного пакета программ (например, с использованием известной лицензионной программы «COSMOS»).

Итак, пусть u_r — расчетное значение радиальных перемещений контура выработки, полученное без учета разброса свойств.

Используем полученную зависимость (7) в качестве «поправочного» коэффициента. Тогда реальное значение смещений контура составляет:

$$u_r^* = u_r(1 + 0,01 \cdot \Delta u), \quad (9)$$

где $\Delta u(\%)$ определяется зависимостью (7).

Аналогично можно уточнить и размер зоны разрушения, полученный из какого-либо аналитического решения, а именно:

$$r_L^* = r_L(1 + 0,01 \cdot \Delta r_L).$$

Таким образом, для практического использования в инженерных расчетах могут быть рекомендованы два вида методик определения смещений и нагрузок на крепь подготовительной выработки вне зоны влияния очистных работ:

- «полная» методика, которая использует уточненный алгоритм МКЭ с включением в него датчиков случайных чисел и предварительный статистико-вероятностный анализ исходных данных;
- «упрощенная» методика, которая использует результаты уже проведенного вычислительного эксперимента большого объема в виде поправочных коэффициентов.

Достоинства «полней» методики определяются, прежде всего, широкими возможностями МКЭ:

- моделирование любой формы обнажения (в том числе взаимовлияющие выработки, сопряжения);
- задание внешней нагрузки в любой форме;
- моделирование слоистости, макротрещин, зон обрушенных и уплотненных пород, элементов охраны выработок и т.д.

Кроме перечисленных добавим сюда те преимущества, который дает новый, уточненный, алгоритм: возможность учета стохастического разброса свойств, вызванного неоднородностью породного массива. Сложностью является многоэтапность подготовки исходных данных, необходимость их правильной вероятностной оценки для выбора закона, по которому будет осуществляться генерация исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-94-80. Нормы проектирования, глава 94. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982.
2. Шаумян Л.В. Физико-механические свойства массивов скальных пород. – М.: Недра, 1972. – 118 с.
3. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – Кийв: Університетське видавництво «Пульсари», 2002. — 302 с.
4. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кужель С.В. Масштабный эффект в горных породах: Дніпропетровськ: «АРТ-ПРЕСС», 2004. – 129 с.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1975. – 333 с.
6. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969. – 388 с.
7. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т.2: Получисленные алгоритмы. – М.: Мир, 1977. – 724 с.
8. Hammersley J.M. and Handscomb D.C. Monte Carlo Method. – Methuen, 1967. – 135 р.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
10. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Сдвижкова О.О. – доктор технических наук, профессор, Национальный горный университет, Днепропетровск, rector@ntmu.org.ua
Бабец Д.В. – Национальный горный университет, Днепропетровск, rector@ntmu.org.ua



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

| Автор | Название работы | Специальность | Ученая степень |
|---|---|---------------|----------------|
| ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР (г.САНКТ-ПЕТЕРБУРГ) ФГУ «4-го ЦЕНТРАЛЬНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА МИНОБОРОНЫ РОССИИ» | | | |
| ГРИГОРЬЕВА Ольга Викторовна | | | |
| ГРИГОРЬЕВА Ольга Викторовна | Методика идентификации нефтезагрязнений почвогрунтов по данным много- и гиперспектральной оптико-электронной аэросъемки | 25.00.36 | к.т.н. |