

Разработка имитационной модели для расчета устойчивости подземной горной выработки

Проанализированы исследования расчетов методов устойчивости подземных горных выработок со случайными распределениями значений прочности. Рассмотрена возможность использования программы Simulink (дополнительный модуль программного обеспечения MATLAB®) для имитационного моделирования. Разработаны алгоритм расчета и имитационная модель для определения разрушения горной выработки с распределением прочности по нормальному закону.

Ключевые слова: имитационная модель, имитационное моделирование, устойчивость горной выработки, прочность горной выработки, вероятность разрушения горной выработки, крепость пород, глубина заложения выработки, моделирование выработки в Simulink MATLAB.

Контактная информация: m_dima@3g.ua

При строительстве и эксплуатации подземных горных выработок важное значение имеет их устойчивость от разрушения, учитывающая случайные отклонения расчетных величин от их средних значений прочности. При выполнении расчета детерминированные величины и зависимости заменяются случайными. Решению данной задачи посвящены многочисленные научные исследования, основные результаты которых принадлежат А. Р. Ржаницыну, В. В. Болотину, А. Н. Шашенко и другим ученым [1, 2, 5].

Цель работы – разработка алгоритма и выполнение предварительного расчета вероятностного разрушения горных выработок с использованием имитационных моделей с применением программного обеспечения Simulink MATLAB®, которое позволяет моделировать с необходимой точностью для практических расчетов.

Увеличение глубины разработки угольного или рудного месторождения повышает напряжение на контуре проходческой горной выработки, что замедляет темпы ее проведения при подготовительных и нарезных работах и нередко приводит к возникновению аварийных ситуаций.

При строительстве горных выработок экономически выгодно использовать математические модели, так как натурные эксперименты не всегда возможны и (или) более дорогостоящие. Математическая модель – это абстрактное описание системы объекта с некоторой его детализацией. Вид модели зависит от свойств объекта, задач исследования и методики моделирования.

Общепринято разделение математических моделей на три основных вида [3, 4]: теоретические (аналитические, математические, имитационные и др.), лабораторные (фи-



А. Б. ВЛАДКО,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)



Д. В. МАЛЬЦЕВ,
канд. техн. наук
(Национальный горный университет)

зические и др.) и натурные (промышленный эксперимент, шахтные и др.).

Характерной особенностью аналитических моделей является описание работы элементов модели в виде некоторых соотношений – математических уравнений, логических условий либо их комбинация.

Один из видов моделирования – имитационная модель, в которой логико-математическая модель исследуемой системы представляет собой алгоритм функционирования системы, программно реализуемый на компьютере [4]. Имитационная модель дает возможность провести исследования структуры и функций реальных процессов и выполнить оптимизацию некоторых его параметров. Она воспро-

изводит процесс функционирования системы во времени, причем имитируется большое количество элементарных событий с сохранением их взаимодействия. Это позволяет оценить устойчивость выработки во времени и другие характеристики.

Средствами имитационного моделирования решаются следующие типовые задачи:

- моделирование процессов устойчивости для определения временных и технологических параметров;
- моделирование процессов устойчивости выработки на различных этапах жизненного цикла с учетом физико-механических свойств пород;
- анализ адаптивных свойств системы выработка–породный массив.

В результате совершенствования программного обеспечения компьютеров появилась возможность более точно моделировать различные системы. При этом уменьшаются затраты на проектирование горных выработок, так как многие параметры уточняются еще в ходе компьютерного моделирования.

Для создания имитационной модели требуется специальное программное обеспечение – система моделирования. В качестве такой системы использовалась программа Simulink – интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем, входящий в программный продукт MATLAB®. С помощью этой программы можно строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты. Программа Simulink полностью интегрирована с MATLAB®, обеспечивая доступ к широкому спектру инструментов анализа и проектирования.

Имитационная модель должна отражать многочисленные параметры, логику и закономерности поведения моделируемого объекта во времени и пространстве. Один из самых простых методов имитационного моделирования – статистическое, под которым понимают машинное воспроизведение функционирования вероятностных моделей либо исследования детерминированных процессов, заданных в виде математических моделей с логическими элементами, с помощью статистических испытаний (метод Монте-Карло). Особенностью

статистического моделирования является случайное задание данных с известным законом распределения и, как следствие, вероятностное оценивание характеристик исследуемых процессов. Статистическое моделирование наиболее эффективно при исследовании слабоорганизованных систем с несложной логикой функционирования.

Современные средства моделирования в большинстве случаев позволяют гарантировать высокий уровень адекватности модели. Авторы предлагают имитационную модель расчета разрушения горной выработки с использованием программы Simulink. Моделирование осуществляется в такой последовательности.

Первый этап – выполнение структурного анализа реальных процессов с разложением на подпроцессы:

- обработка данных прочности горных пород вокруг подземных выработок;
- определение распределения прочности горных пород вокруг подземных выработок по нормальному закону.

Второй этап – описание функции, выполняемое каждым подпроцессом модели, и условия взаимодействия всех подпроцессов моделирования:

- описание функций характеристики безопасности горных выработок;
- определение вероятности разрушения круглого контура выработки с использованием интеграла вероятности Гаусса.

С этой целью следует спроектировать паспорт буровзрывных работ на основе рассчитанных координат шпуров и определить вероятность разрушения пород на контуре горной выработки (методика оценки достаточно отработана и основана на вычислении коэффициента запаса прочности и характеристике безопасности [1]):

$$\Delta = n - 1/\sqrt{n^2 V_{сж}^2 + V_{\theta}^2}, \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса прочности,

$$n = \bar{\sigma}_{сж} / \sigma_{\theta}, \quad (2)$$

$\bar{\sigma}_{сж}$ – прочность массива на одноосное сжатие;
 σ_{θ} – напряжение на контуре выработки, принимается постоянным,

$$\sigma_{\theta} = 2\gamma^2 H, \quad (3)$$

γ и H – объемный вес массива и глубина заложения выработки; $V_{сж}$ и V_{θ} – коэффициенты вариации прочности и напряжения, принимаются равными изменчивости пород: $V_{сж} = V_{\theta}$,

$$V_{сж} = s/R \cdot 100, \quad (4)$$

s – среднее квадратичное отклонение частных результатов испытания от средней прочности \bar{R} ,

$$s = \sqrt{\sum(R - \bar{R})^2 / (k - 1)}, \quad (5)$$

$$\bar{R} = \sum(R/k), \quad (6)$$

R – предел прочности отдельного образца;

k – количество испытанных образцов.

Вероятность разрушения контура выработки, выраженная в долях от периметра, определяется с помощью интеграла вероятности Гаусса:

$$v = 0,5 - (1 / \sqrt{2\pi}) \int_0^{\Delta} e^{-t^2/2} dt. \quad (7)$$

Третий этап – построение имитационной модели и корректирование ее связей. Для предварительных расчетов были использованы исходные данные крутопадающего месторождения железных руд мощностью до 90 м с породами висячего блока из кварцитов и лежащего – из песчаников и сланцев.

Цель моделирования – определить вероятность разрушения горных выработок, заложенных на горизонтах от 300 до 900 м с прогнозируемой глубиной до 1200 м. Имитации выполняли с помощью программного обеспечения MATLAB® в приложении Simulink. На рис. 1 приведены основные обозначения и переменные, использованные в математической модели разрушения выработки.

Основной блок, имитирующий прочность выработки, – блок Subsystem 1, принци-

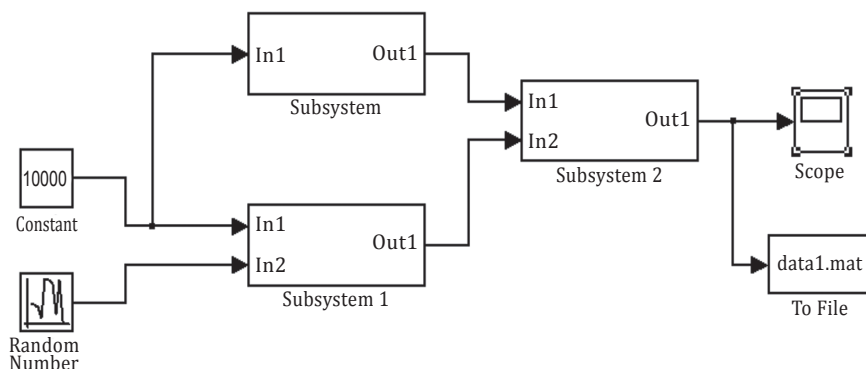


Рис. 1. Общая структурная схема имитационной модели, выполненной с помощью программного обеспечения MATLAB® в приложении Simulink: Subsystem – напряжения на контуре выработки; Subsystem 1 – прочность горной выработки; Subsystem 2 – показатель безопасности горной выработки; Constant – блок, имитирующий среднюю крепость пород; Random Number – блок, имитирующий закон распределения прочности пород вокруг выработки.

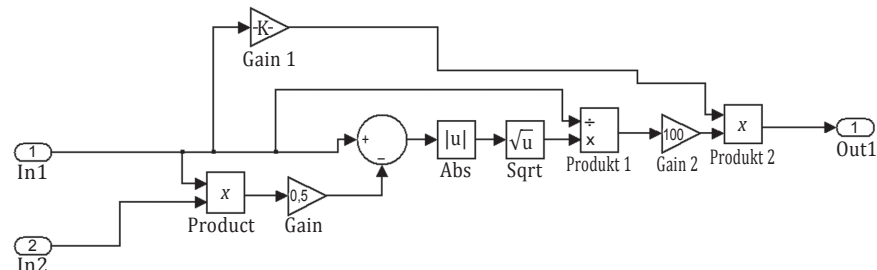


Рис. 2. Принципиальная схема работы блока Subsystem 1: Gain, Gain1, Gain2, Product, Product1, Product2, Abs, Sqrt, In1, In2, Out1 – внутренние операторы программы.

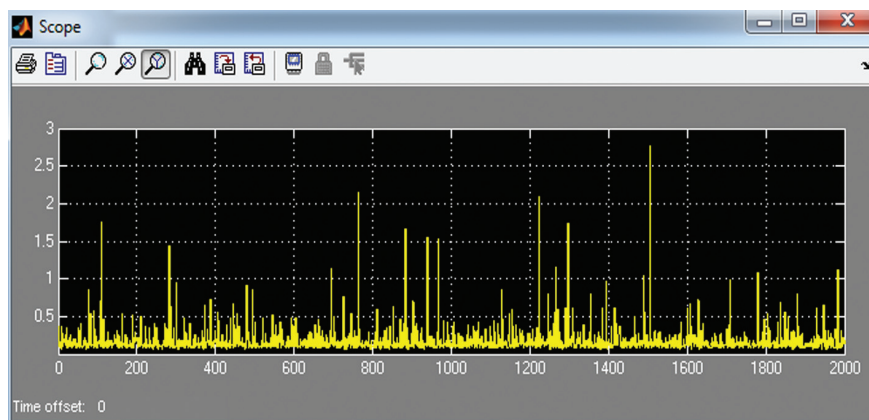


Рис. 3. Изменение прочности контура выработки при моделировании в приложении Simulink MATLAB® (блок Scope), ось абсцисс – количество случайных измерений, ось ординат – коэффициент запаса прочности.

альная схема которого изображена на рис. 2. Результаты моделирования записываются в файл результатов с использованием блока To File, а также заносятся в блок Scope. Пример результатов моделирования показан на рис. 3.

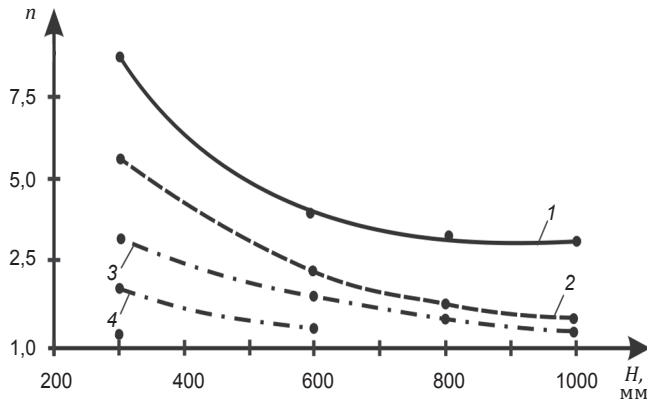


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса прочности n горной выработки от глубины ее заложения H (крепость пород по шкале проф. М. М. Протоdjяконова): 1 – породы крепостью 14–15; 2 – породы крепостью 10–12; 3 – породы крепостью 7–9; 4 – породы крепостью 6–8.

Четвертый этап – проведение эксперимента и получение результатов моделирования. На рис. 4 показана зависимость коэффициента запаса прочности выработки (резерв прочности) от глубины заложения. На основании полученных значений вероятности разрушения горной выработки можно констатировать: запас ее прочности с увеличением глубины уменьшается до 1,2, при этом если кровля в основном состоит из кварцитов, то запас прочности достаточен для проведения без крепи, если из других типов пород, то возникает необходимость обустройства выработки иными средствами крепления.

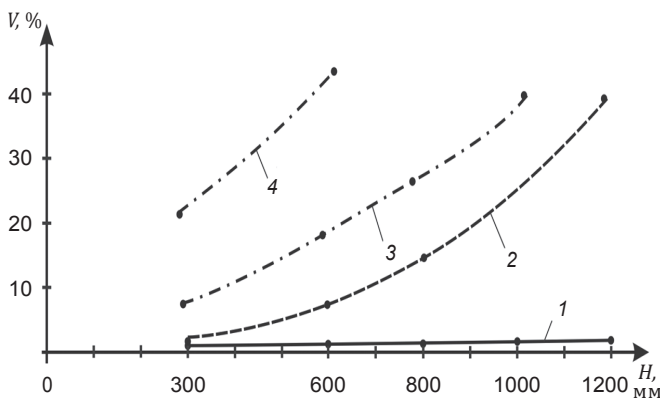


Рис. 5. Зависимость вероятности разрушения V горной выработки от глубины H ее заложения (крепость горных пород по шкале проф. М. М. Протоdjяконова): 1 – породы крепостью 14–15; 2 – породы крепостью 10–12; 3 – породы крепостью 7–9; 4 – породы крепостью 6–8.

Из результатов моделирования также следует, что с возрастанием глубины заложения подземных выработок повышается вероятность их разрушения до 45 %.

Анализ значений вероятности разрушения горной выработки, представленных на рис. 5, показал: для пород крепостью 14–15 по шкале проф. М. М. Протоdjяконова вероятность разрушения с глубиной не увеличивается; для пород крепостью 10–12 и 7–9 вероятность разрушения возрастает по степенной зависимости от глубины заложения выработки; породы крепостью 6–8 согласно моделированию сохраняют устойчивость до глубины 600 м.

Выводы. Разработана имитационная модель с применением программного обеспечения Simulink MATLAB®, связывающая устойчивость незакрепленных горных выработок со случайными распределениями значений прочности пород на различной глубине заложения выработок, что позволяет прогнозировать их устойчивость.

На примере предварительных расчетов для условий проведения проходческой выработки по породам крепостью от 14 до 6 (по шкале проф. М. М. Протоdjяконова) установлены зависимости коэффициента запаса прочности горной выработки от глубины ее заложения, который варьируется в диапазоне от 9 до 1,2 и вероятностью разрушения от 2 до 45 % соответственно.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением глубины заложения выработки до 1000–1200 м затраты на поддержание ее устойчивости будут возрастать пропорционально глубине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ржаницын А. Р. Строительная механика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1982. – 400 с.
2. Шашенко А. Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.04 «Подземное строительство» / А. Н. Шашенко. – Днепропетровск, 1988. – 495 с.
3. Фізико-хімічна геотехнологія: навч. посіб. / М. М. Табаченко, О. Б. Владико, О. Є. Хоменко, Д. В. Мальцев. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – 310 с.
4. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1999. – 271 с.
5. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.