

Н.Л. Бельтюков, А.В. Евсеев

Пермский государственный технический университет

СОПОСТАВЛЕНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены условия применения упругих характеристик горных пород, полученных статическим и динамическим методами. Определены упругие характеристики основных типов горных пород Верхнекамского месторождения калийных солей ультразвуковым методом. Произведено сопоставление динамического и статического модулей упругости, получено корреляционное уравнение их взаимосвязи.

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости подземных конструкций наиболее часто используются деформационные показатели, определенные статическим методом при испытании образцов под нагрузкой. Однако при выполнении ряда технологических процессов (бурение, взрывание и т.д.) характерен динамический характер нагружения, что требует использования при расчетах специальных показателей, определенных в аналогичных условиях приложения нагрузки. Этим требованиям удовлетворяют упругие характеристики, полученные по результатам изучения распространения упругих колебаний в образцах горных пород (динамический метод определения упругих характеристик). Данный метод относится к неразрушающим методам контроля состояния материала и позволяет судить о структурно-текстурных особенностях строения горной породы и ее упругих свойствах (динамический модуль упругости, динамический коэффициент Пуассона и др.).

Статические и динамические характеристики пород иногда сильно различаются между собой. Их необоснованное использование может отразиться на результатах расчетов. Поэтому очень важно знать условия применения и получения динамических характеристик горных пород и их связь со статическими.

Скорости распространения продольной и поперечной упругих волн являются важными динамическими характеристиками горных пород. На сегодняшний день существует несколько методов определения скоростей. Наиболее распространенный из них – импульсный метод. Он основан на непосредственном измерении времени прохождения звукового импульса через образец от излучателя к приемнику (прямое прозвучивание). Излучатель и приемник при этом располагаются на противоположных торцах образца [3]. Скорость прохождения продольной волны определяется по формуле

$$c_{\text{пр}} = \frac{L}{t}, \quad (1)$$

где $c_{\text{пр}}$ – скорость продольной волны, м/с; L – длина образца, м; t – время прохождения импульса по образцу, с. Скорость прохождения поперечной волны определяется аналогичным образом. Время прихода поперечной волны отмечается по вступлению колебаний амплитуды большей, чем амплитуда продольной волны.

Зная скорости распространения продольной и поперечной волн, можно вычислить динамический модуль упругости (E_d) и динамический коэффициент Пуассона (μ):

$$E_d = c_{\text{пр}}^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}, \quad \mu = \frac{0,5 - R^2}{1 - R^2},$$

где $c_{\text{пр}}$ – скорость продольной волны, м/с; ρ – плотность горной породы, кг/м³; R – отношение скорости поперечной волны к скорости продольной волны.

Для получения динамических характеристик была проведена серия экспериментов по определению скорости прохождения продольных и поперечных волн в образцах горных пород с помощью низкочастотного ультразвукового дефектоскопа – УД2Н-ПМ (рис. 1). Дефектоскоп реализует теневой, эхо- и зеркально-теневой методы контроля и позволяет проводить измерения в диапазоне частот от 20 до 1250 кГц.

С целью проведения экспериментов были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 100 и 200 мм. Данные размеры образца и частота удовлетворяют условию образования продольных волн со скоростью, равной скорости распространения волн в безграничной среде. Время прохождения продольных и поперечных волн через образец определялось с помощью теневого метода (рис. 2). Частота зондирующего импульса – 300 кГц. Скорости прохождения упругих волн вычислялись по формуле (1).



Рис. 1. Внешний вид ультразвукового дефектоскопа УД2Н-ПМ

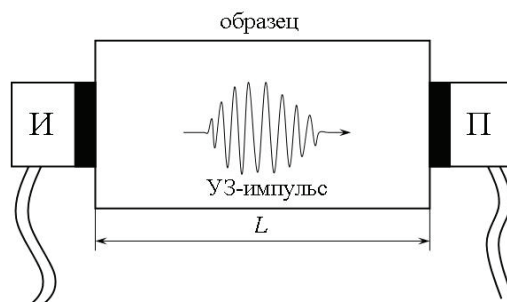


Рис. 2. Схема прозвучивания образца теньевым методом

В ходе проведения экспериментов было исследовано около 250 образцов различных типов пород, залегающих на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС). При обработке результатов для каждого образца вычислялся динамический коэффициент Пуассона (таблица) и динамический модуль упругости.

Средние значения скоростей продольных и поперечных волн и динамический коэффициент Пуассона некоторых горных пород ВКМКС*

| Порода | Скорость продольных волн, м/с | Скорость поперечных волн, м/с | Динамический коэффициент Пуассона |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Алевролит | 3500–4500 | 2000–2600 | 0,23±0,06 |
| Песчаник | 3300–3900 | 2000–2400 | 0,20±0,02 |
| Аргиллит | 3300–3900 | 2000–2200 | 0,23±0,02 |
| Известняк | 3500–3900 | 2170–2330 | 0,19±0,02 |
| Доломит | 3300–4900 | 2000–2600 | 0,26±0,07 |
| Гипс | 3700–4900 | 2200–2600 | 0,27±0,05 |
| Ангидрит | 3000–5000 | 1600–2800 | 0,2±0,1 |
| Мергель | 3300–5300 | 1300–3000 | 0,2±0,1 |
| Каменная соль | 3500–3700 | 2060–2200 | 0,23±0,02 |
| Карналлит | 2700–3500 | 1500–1900 | 0,2±0,1 |
| Сильвинит пестрый | 2100–3100 | 1300–1900 | 0,2±0,1 |
| Сильвинит полосчатый | 2500–3500 | 1500–2500 | 0,1±0,1 |
| Сильвинит красный | 3100–3700 | 1900–2300 | 0,18±0,04 |

* Результаты измерений приведены для значения надежности 0,95.

После прозвучивания образцы подвергались испытаниям на одноосное сжатие с определением деформационных показателей (статического модуля упругости и коэффициента Пуассона) в соответствии с ГОСТом [4]. Результаты сопоставления модулей упругости, определенных статическим ($E_{ст}$) и динамическим ($E_{д}$) методами, приведены на рис. 3.

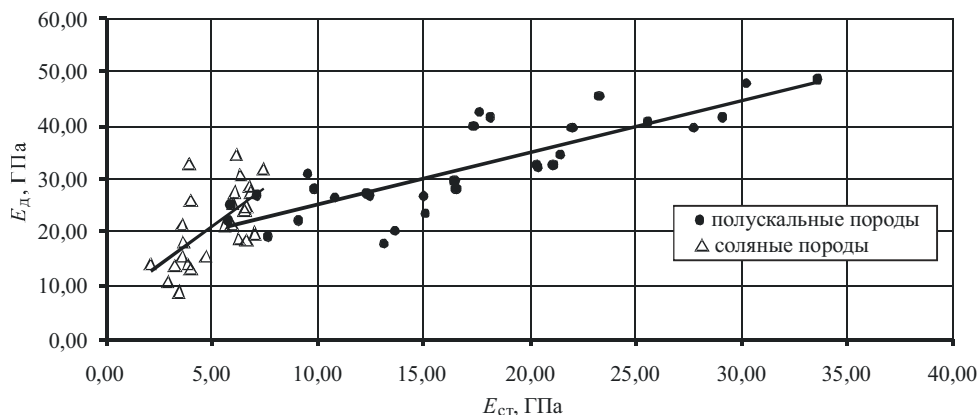


Рис. 3. Взаимосвязь между динамическим и статическим модулями упругости полускальных пород надсоляной толщи и соляных пород ВКМКС

Анализ результатов показывает, что динамический модуль упругости в большинстве случаев выше статического в 2–4 раза; при этом, чем больше упругость, тем значительнее эта разница [1]. Необходимо отметить, что полученные прямые не проходят через начало координат, что можно объяснить, до некоторой степени, пластичностью горных пород и методикой проведения испытаний [2].

По приведенным графикам (см. рис. 3) видно, что между значениями наблюдается линейная зависимость, которая в первом приближении может быть аппроксимирована уравнением

$$E_d = kE_{ст} + b, \quad (4)$$

где k и b – эмпирические коэффициенты, имеющие различные количественные значения для разных типов пород.

Для полускальных пород (известняки, песчаники и др.) надсоляной толщи ВКМКС $k = 0,97$ и $b = 15,60$.

Для соляных пород (каменная соль, сильвинит и др.) ВКМКС $k = 2,93$ и $b = 6,48$.

Исследуемые показатели имеют достаточно тесную корреляцию (коэффициент корреляции составляет: 0,69 – для полускальных пород; 0,40 – для соляных пород, при надежности определения 0,9).

Таким образом, зная зависимости между статическими и динамическими характеристиками горных пород, можно повысить достоверность геомеханических оценок состояния краевых частей массива горных пород при различных технологических процессах, а также использовать при определении упругих параметров акустические методы, которые значительно упрощают проведение исследований.

В настоящее время задача сводится к тому, чтобы накопить достаточно большой экспериментальный материал по скоростям прохождения волн в горных породах и определению их упругих свойств статическим методом для уточнения корреляционных зависимостей различных типов горных пород.

Список литературы

1. Ватолин Е.С. Некоторые динамические свойства и природа деформирования горных пород. – М.: Наука, 1966. – 260 с.
2. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая [и др.]. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
3. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1984. – 271 с.
4. ГОСТ 28985–91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

Получено 27.04.2010