

УДК 622.831 (575.2) (04)

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА
С АКУСТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

А.Ш. Мамбетов – ст. научн. сотрудник

On the base of correlation analysis close link is proved between rock acoustic parameter and its lasting properties and intense condition.

Перспективными методами определения механических свойств и напряженного состояния горных пород без их разрушения являются геоакустические методы, позволяющие вести измерения с достаточной точностью. Они дают возможность внедрять сплошной, непрерывный контроль механических свойств и состояния пород, необходимых для оперативного управления процессами горного производства.

Геоакустические методы изучения механических свойств и напряженного состояния основаны на предложении и наличии связи механических характеристик, напряженного состояния горных пород с акустическими параметрами.

Анализ корреляционных зависимостей между прочностью пород на сжатие и их акустическими свойствами [1-3] позволил выделить следующие их типы:

$$\sigma_{сж} = \frac{a}{b - V_p} - C, \quad (1)$$

$$\sigma_{сж} = a + bV_p, \quad (2)$$

$$\sigma_{сж} = aV_p^b, \quad (3)$$

$$\sigma_{сж} = aV_p^2 + bV_p + C, \quad (4)$$

$$\sigma_{сж} = \rho V_p^2 + a, \quad (5)$$

$$\sigma_{сж} = (a\rho - b)^2, \quad (6)$$

$$\sigma_{сж} = aV_p + bV_p\alpha_1 - C\alpha_1 - d, \quad (7)$$

где V_p – скорость продольной волны, м/с; a, b, d – постоянные для породы данного месторождения и данного вида зависимости; α_1 – коэффициент затухания продольной волны; ρ – объемная масса.

Анализ [4–5] показал, что если за основу корреляционной зависимости брать один акустический параметр (например V_p), то коэффициент вариации расчетного предела прочности относительно фактического значения прочности составляет 25–40%. При двух акустических параметрах $\rho V_p, \alpha_1 V_p$ (формулы 5 и 7) коэффициент вариации составляет уже 10–25%, а при трех параметрах (ρ, V_p, V_s) – 10–20%.

Так, например, определены корреляционные связи для известняка месторождения Хайдаркан и получены следующие зависимости:

$$\sigma_{сж} = f(V_p), \sigma_{сж} = 0,042V_p - 84,3; \quad (8)$$

$$\tau_{сж}^{V_p} = 0,434$$

$$\sigma_{сж} = f(V_p^2), \sigma_{сж} = 31,2 + 3,78V_p^2; \quad (9)$$

$$\tau_{сж}^{\rho V_p} = 0,427,$$

$$\sigma_{сж} = f(\rho V_p), \sigma_{сж} = 1,3V_p^2 \rho - 42,5; \quad (10)$$

$$\tau_{сж}^{\rho V_p} = 0,351,$$

$$\sigma_{сж} = f(V_p, V_p^2); \quad (11)$$

$$\sigma_{сж} = -1713,3 + 673,6V_p - 60,8V_p^2;$$

$$\tau_{сж}^{V_p V_p^2} = 0,471,$$

Таблица 1

ГЕОМЕХАНИКА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД ГОРНОГО МАССИВА

Сравнительный анализ способов определения свойств горных пород

Показатель	Номер зависимости					
	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
$\sigma_{сж}$, МПа	117,3	118,5	119,7	118,4	124,8	92,7
O_o , %	24,76	26,0	26,7	25,9	32,8	-1,4
U	5,0-3,1	6,3-3,9	8,2-5,5	4,4-2	5,3-2,7	11,3-5,6

$$\sigma_{сж} = f(\rho); \quad (12)$$

$$\sigma_{сж} = (64,4 - 20,15\rho)^2; \tau_{сж}^{\rho} = 0,678,$$

$$\sigma_{сж} = f(1/M_A); \sigma_{сж} = \frac{1234,9}{48,78 - M_A \times 10^{-9}}; \quad (13)$$

$$\tau_{сж}^{M_A} = 0,912.$$

Сравнительный анализ перечисленных зависимостей по информативности использованного акустического параметра и величине относительной ошибки представлен в табл. 1.

Относительная ошибка O_o определена для образца известняка с данными: $\sigma_{сж} = 94,0$ МПа; $\alpha = 0,01$ см⁻¹; $\rho = 2,64 \times 10^3$ кг/м³; $V_p = 4800$ м/с; $V = 2800$ м/с

$$O_o = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_{сжп}}{\sigma_{сжп}} \times 100\%, \quad (14)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, определенный по корреляционным зависимостям; $\sigma_{сжп}$ – предел прочности на сжатие, определенный экспериментально.

Из табл. 1 вытекает, что наибольший показатель информативности U имеет акустический модуль больше 3. По градуированным зависимостям на основе акустического модуля можно определить комплекс механических свойств: пределы прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$); растяжение (σ_p); срез ($\sigma_{сдв}$); сцепление (C) скальных пород.

Зависимость предела прочности на сжатие и растяжение от акустического модуля. Все породы при доведения их до разрушения проявляют упругие и пластические деформации. Анализ кривых “напряжение-деформация” позволяет при всем их различии обнаружить общность принципиального характера: каждая из них может быть разделена на две области – линейную (рис. 1, участок OA) и криволинейную (участок AB). Криволинейный участок аппроксимируется прямой, так что величина разрушающих деформаций имеет вид

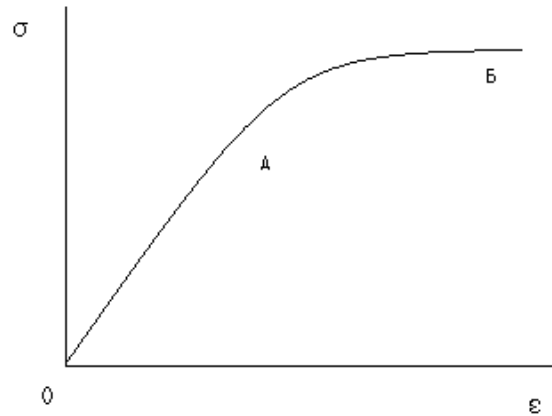


Рис. 1. Диаграмма разрушения образца известняка Хайдаркана при одноосном сжатии.

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r - \sigma_a}{\varepsilon_k}, \quad (15)$$

причем формула (15) соответствует граничным условиям:

если $\sigma_i = \sigma_r$, то $\varepsilon_i = \varepsilon_r$;

если $\sigma_i = 0$, то $\sigma_a = 0$ и $\varepsilon_i = 0$.

Подставляя величины разрушающих деформаций в формулу Гука, получаем

$$\sigma_i = \varepsilon \left(\frac{\sigma_r - \sigma_a}{\varepsilon_k} \right), \quad (16)$$

$$\sigma_i = \frac{\varepsilon \sigma_a}{\varepsilon - \varepsilon_k}. \quad (17)$$

Подставляя в формулу (17) из формулы $\varepsilon = \ar V \rho V_s$ (18), получаем

$$\sigma_{сж} = \frac{M_n}{M_A - N_n}, \quad (19)$$

$$M_n = \frac{\sigma_a \varepsilon}{a} \quad \text{и} \quad N_n = \frac{\varepsilon_k}{a}, \quad (20)$$

где M_n , N_n – постоянные величины для образцов одного вида породы; σ_a – максимальная величина прочности на прямолинейном участке

кривой “напряжение-деформация”, МПа; ε_k – модуль криволинейной части эпюры, МПа; M_A – акустический модуль, Дж/м³; a – коэффициент формулы (18); ε – модуль упругости, МПа.

Для тех же самых условий, но для упруго-пластических пород общая формула имеет вид:

$$\sigma_{сж} = \frac{M}{N - M_A}, \quad (21)$$

где $M = \frac{\varepsilon_k \sigma_a}{a}$ и $N = \frac{\varepsilon_k}{a}$.

Как известно, процесс деформации и разрушения при растяжении горных пород симметричен деформации и разрушению при сжатии. Поэтому зависимость между пределом прочности на растяжение и акустическим модулем имеет такой же вид:

а) для упругих и упруго-пластических пород –

$$\sigma_p = \frac{M_p}{N_p - M_A}, \quad (22)$$

б) для пластических пород –

$$\sigma_{pn} = \frac{M_{pn}}{M_A - N_{pn}}, \quad (23)$$

где M_p, N_p – постоянные величины для образцов одного вида упругой породы; M_{pn}, N_{pn} – постоянные величины для образцов одного рода пластической породы из одного месторождения; σ_p, σ_{pn} – предел прочности на растяжение.

Предел прочности при сдвиге $\sigma_{сдв}$ определяем при взаимодействии как сжимающих, так и растягивающих или сдвигающих напряжений.

а) для упруго пластических пород

$$\sigma_{сдв} = \frac{M_o}{N_o - M_A}, \quad (24)$$

$$C = \frac{M_c}{N_c - M_A}, \quad (25)$$

б) для пластических пород

$$\sigma_{сдв} = \frac{M_{он}}{M_A - N_{он}}, \quad (26)$$

где $M_{он}, N_{он}, M_c, M_o, N_o, M_k, N_k$ – постоянные для данного рода пород и свойств из одного месторождения; C – сцепление.

Примеры определённых по формулам (21, 22, 23, 24, 25) величин $M, N, M_p, N_p, M_{сдв}, M_c, N_c$ для предела прочности на сжатие, растяжение, сдвиг и сцепление табл. 2–5.

Таблица 2

Величины M и N , вычисленные для пород

Месторождение, порода	п, шт.	$M \cdot 10^9$	$N \cdot 10^9$	τ	Интервал действия зависимости $M_A \cdot 10^9$, Дж/м ³
Хайдаркан, известняки	10	-1234,9	48,8	0,912	34,3 – 45,0

Таблица 3

Величины M_p и N_p , вычисленные для пород

Хайдаркан, порода	п, шт.	$M_p \cdot 10^9$	$N_p \cdot 10^9$	τ	Интервал действия зависимости $M_A \cdot 10^9$, Дж/м ³
Известняки	10	18	34,1	0,752	35,3 – 48,2
Сланцы	6	-15,7	43,1	0,998	36,0 – 39,0

Таблица 4

Величины $M_{сдв}$ и $N_{сдв}$, вычисленные для пород

Месторождение, порода	п, шт.	$M_{сдв} \cdot 10^9$	$N_{сдв} \cdot 10^9$	τ	Интервал зависимости $M_A \cdot 10^9$, Дж/м ³
Хайдаркан, известняки	7	-414,9	30,6	0,954	15,0 – 27,0

Таблица 5

Величины M_c и N_c , вычисленные для пород

Месторождение, порода	п, шт.	$M_c \cdot 10^9$	$N_c \cdot 10^9$	τ	Интервал зависимости $M_A \cdot 10^9$, Дж/м ³
Хайдаркан, известняки	9	135,6	52,3	0,734	55,0 – 63,0

Полученные величины показывают довольно высокие коэффициенты корреляции, т. е. самый малый разброс.

Следовательно, физические взаимосвязи между акустическим модулем и механическими свойствами скальных пород, позволяющие с достаточной степенью точности рассчитывать ряд наиболее важных для проектирования, контроля и оперативного управления процесса горного производства свойств: пределы прочности горных пород на одноосные сжатие, растяжение, на сдвиг, сцепление.

Анализ результатов сравнительных измерений напряжений в породном массиве [6], проведенных методом разгрузки и геоакустическим методом, полученные в условиях Хайдарканского и Терексайского месторождений, показали прямую зависимость изменения акустического модуля от величины напряжения.

Установлены основные физические показатели, характеризующие напряженное состояние породного массива, и разработаны соответствующие им критерии оценки по геоакустическому контролю вблизи и вне влияний горных выработок:

- характер распределения напряжений в массиве, определяющийся по распределению акустического модуля;
- критическое напряжение, наличие которого устанавливается по величине акустического модуля относительно пороговых значений;
- степень анизотропии напряжений, которая характеризуется отношением акустических

модулей в горизонтальной и вертикальной плоскости массива;

- при слоистом строении массива влияние анизотропии свойств на состояние массива оценивается по величине параметров анизотропии;
- эффективное сечение выработки устанавливается по результатам прозвучивания.

Литература

1. Ржевский В.В., Новик Т.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984.
2. Ямщиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.
3. Терметчиков М.К. Физико-механические свойства горных пород месторождений Киргизии и их корреляционный анализ. – Фрунзе: Илим, 1979.
4. Мамбетов Ш.А., Абдиев А.Р., Мамбетов А.Ш. Зональная и поэтапная оценка породного массива Тянь-Шаня. – Бишкек: КРСУ, 2003.
5. Хржан Т. Физико-техническое обоснование и разработка метода комплексной оценки механических свойств горных пород для оперативного управления процессами горного производства: Автореф. дисс. докт. техн. наук. – М., 1990.
6. Ялымов Н.Т., Мамбетов Ш.А. и др. Результаты сравнительных измерений напряжений в массиве горных пород // Изменение напряжений в массиве горных пород. Ч. 1. – Новосибирск, 1974.