

УДК 622.831 (575.2) (04)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ
В НЕНАРУШЕННОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ
И КОНТРОЛЬ ИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

А.Ш. Мамбетов – ст. научн. сотрудник

Through geoaoustic measurements of acoustic module as rock mass informative parameter a change of strain tensor in integral rock mass is monitored and determined.

Для определения полного тензора напряжений в породном массиве бывает достаточно знать величины и направления действия трех главных напряжений, т.е. максимальных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 , действующих вдоль осей системы координат, выбранной так, что в этих направлениях все касательные напряжения равны нулю.

Наиболее оперативным, весьма надежным и наиболее используемым на практике является геоакустический метод определения напряжений в массиве [1–4]. В качестве информативного параметра в данном методе принимается акустический модуль (M_A), равный произведению объемной массы на скорости продольной и поперечной упругих волн.

Теоретически и экспериментально установлены физические взаимосвязи между акустическим модулем и прочностными свойствами, напряженным состоянием пород, позволяющие с достаточной степенью точности определить для проектирования, контроля и управления процессами горнопроизводства и состояния. Возможность применения геоакустического метода определяется критериями [3, 4]:

Ошибка метода

$$\delta = \frac{100\%}{2J}, \quad (1)$$

где $J=1,445 \ln\{\Delta M_A / \Pi_C\}$ – информативность в битах (двоичная логарифмическая единица бит, применяемая в теории информации. $N=\log_2 n$); прирост значения ΔM_A при нагружении образца из данной породы до разрушающих напряжений; Π_C – статистически значимое различие акустического модуля в образцах и массиве вследствие неточности физических свойств пород, напряжений и погрешностей лабораторных и шахтных измерений.

Коэффициент информативности метода

$$\eta = \sigma_c / \sigma_{сж}, \quad (2)$$

где σ_c – напряжение, до которого происходит заметное изменение M_A ; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие при одноосном напряжении.

Величина η обычно оценивается по графикам зависимости от давления при одноосном сжатии образцов в лабораторных условиях.

Условие по применению и возможности геоакустического метода контроля:

1. Метод может применяться при $\eta \geq 0,5$. В этом случае:

а) если $\delta \leq 25$ -30%, метод дает достаточно надежные сведения о поле напряжений в массиве;

б) если $20-3 < \delta < 50\%$, то возможна грубая количественная характеристика поля напряжений в массиве;

в) если $\delta > 50\%$, возможна лишь качественная характеристика поля напряжений.

2. Если $\eta < 0,5$ (т.е. ΔM_A мала), применение геоакустического метода нецелесообразно.

3. С помощью геоакустического метода возможно определение направлений действия главных напряжений.

Определение тензора напряжений производится методом прозвучивания на наблюдательных станциях в изучаемом участке массива, представляющих собой измерительные шпуров или скважины, пробуренные в кровле и стенках выработки по схемам (рис. 1 А, Б, В).

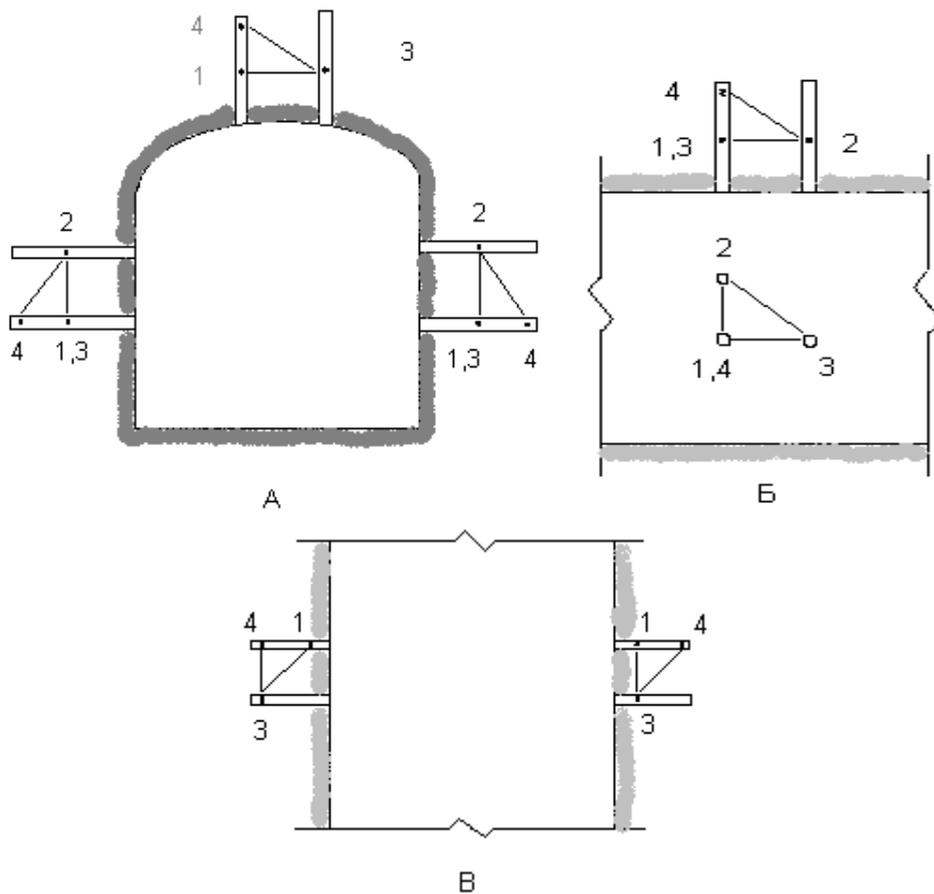


Рис. 1. Схема расположения измерительных шпуров на наблюдательной станции для измерения скоростей упругих волн V_p и V_s в породном массиве: расположение шпуров в кровле (А, Б) и стенке (Б, В) выработки.

Измерение проводится за пределами влияния выработки на поле напряжений, в связи с чем глубина измерительных шпуров выбирается из условия

$$\ell \geq R \left(\frac{10}{\sqrt{\delta}} - 1 \right), \quad (3)$$

где R – радиус выработки, минимальное расстояние между шпурами выбирается не менее 40 см.

В связи с зависимостью акустического модуля от механических напряжений в породном массиве наблюдается анизотропия модуля, выражающаяся в том, что индикатриса модулей в массиве представляет собой эллипсоид.

Результатами геоакустических измерений являются индикатрисы модуля в плоскостях кровли и стенок выработки (рис. 2). Максимумы эллипсов модулей соответствуют проекциям максимального главного напряжения на указанные плоскости. В случае трехшпуровой системы прозвучивания ориентации осей эллипса и величины модулей, соответствующие экстримальным точкам эллипса, определяются следующим образом:

$$\varphi \equiv \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left\{ \frac{2M_{A1}^2 M_{A2}^2 - M_{A3}^2 (M_{A1}^2 + M_{A2}^2)}{M_{A3}^2 (M_{A2}^2 - M_{A1}^2)} \right\}, \quad (4)$$

$$M_{A \max} = \sqrt{(M_{A1}^2 M_{A2}^2 \cos^2 \varphi) / (M_{A1}^2 \cos^2 \varphi - M_{A1}^2 \sin^2 \varphi)}, \quad (5)$$

$$M_{A \min} = \sqrt{(M_{A1}^2 M_{A2}^2 \cos^2 \varphi) / (M_{A2}^2 \cos^2 \varphi - M_{A1}^2 \sin^2 \varphi)}, \quad (6)$$

где M_{Ai} – измеренные значения модулей по трем направлениям между шпурами; φ – угол между большей осью эллипса и горизонтальной осью выбранной системы координат.

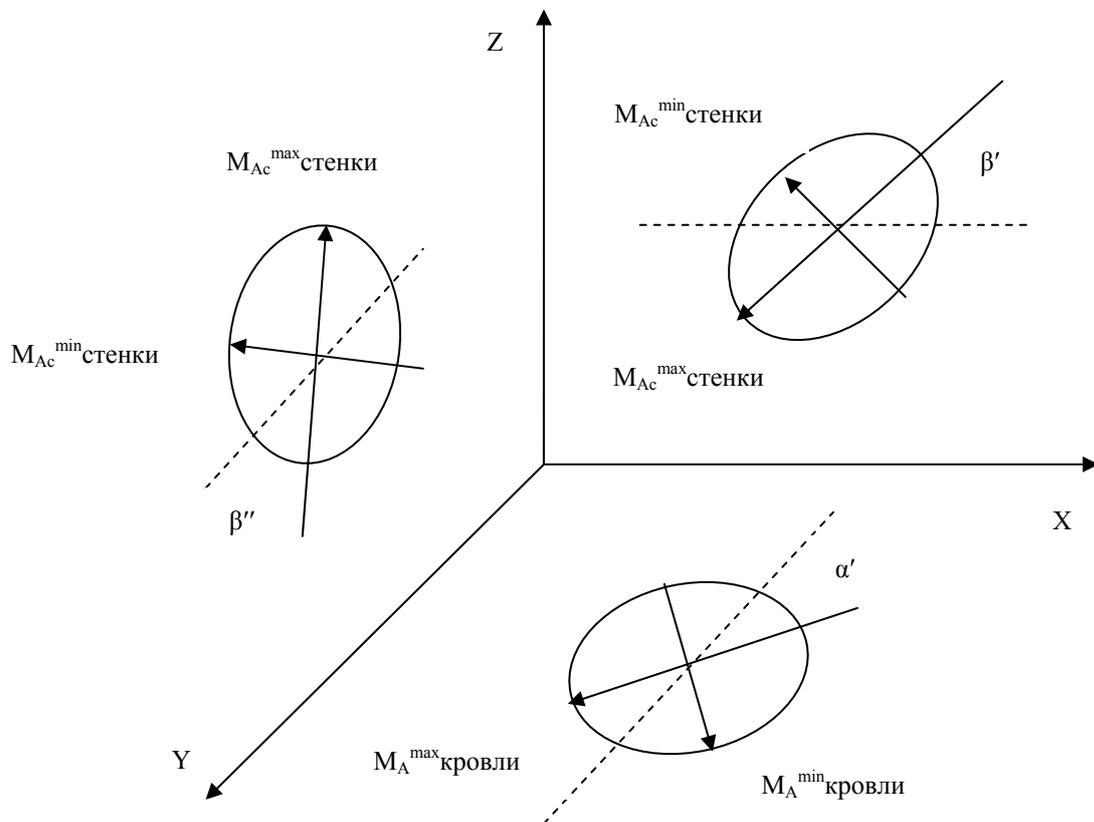


Рис.2. Индикатрисы акустических модулей в плоскости кровли и стенки выработки.

По измеренным и рассчитанным индикатрисам модулей в кровле выработки и одной из ее стенок можно получить направления и величину вектора модуля, соответствующего наибольшему главному нормальному сжимающему напряжению.

$$\alpha = \arccos\left(M_{A_{\max ct}} \cos \beta / \sqrt{M_{A_{\max kp}}^2 + M_{A_{\max ct}}^2 \sin^2 \beta}\right), \quad (7)$$

$$\beta = \arccos\left(M_{A_{\max kp}} \sin \alpha / \sqrt{M_{A_{\max kp}}^2 + M_{A_{\max ct}}^2 \sin^2 \beta}\right), \quad (8)$$

$$\gamma = \arccos\left(M_{A_{\max kp}} \sin \beta / \sqrt{M_{A_{\max kp}}^2 + M_{A_{\max ct}}^2 \sin^2 \beta}\right), \quad (9)$$

$$M_{A_{\max}} = \sqrt{M_{A_{\max kp}}^2 + M_{A_{\max ct}}^2 \sin^2 \beta}, \quad (10)$$

Таким же образом при использовании полученных значений $M_{A_{\max}}$ и $M_{A_{\min}}$ во всех трех координатных плоскостях выработки можно получить направления и величину других векторов модуля, соответствующих главным напряжениям.

Геоакустические измерения являются относительными. Для определения абсолютной величины напряжений необходимо иметь тарировочную зависимость модуля от напряжения в виде графиков или корреляционных уравнений. Такую зависимость получают в лабораторных условиях при основном давлении образцов из исследуемых горных пород с использованием испытательных машин с пределом нагружения $P \geq 50$ т, при одновременном измерении скоростей V_p и V_s . Для изготовления образцов можно использовать керн разведочного бурения. Размеры образца должны удовлетворять следующим условиям:

а) минимальный размер образца должен не менее чем в 10 раз превосходить минимальный размер неоднородности (для мелкозернистой породы $2r=40 \div 60$ мм; $l=100-150$ мм);

б) $r/\lambda > 1,25$; $l/\lambda > 3$, где r и l – радиус и длина образца, λ – длина волны.

Экспериментально полученная зависимость M_A от σ с помощью корреляционных методов может быть выражена в виде аналитической функции $M_A = f(\sigma)$, что гораздо удобнее при практическом использовании.

Пример. В результате геоакустических измерений в выработке диаметром 4 м, пройденной в массиве из песчаника ($\gamma=2,67$ г/см³) на глубине $H=120$ м, на замерной станции по трехшпуровой схеме получены следующие значения M_A :

Объект	V_{p1} , м/с	V_{s1} , м/с	$M_{A1} \cdot 10^9$, Дж/м ³	V_{p2} , м/с	V_{s2} , м/с	$M_{A2} \cdot 10^9$, Дж/м ³	V_{p3} , м/с	V_{s3} , м/с	$M_{A3} \cdot 10^9$, Дж/м ³
Стенка	3520	2350	99,0	3340	2230	19,9	3210	2140	18,3
Кровля	3840	2560	26,2	3520	2350	22,0	3650	2430	23,7

В лаборатории на образцах получено следующее корреляционное уравнение в диапазоне измерения: P от 24 до 48 кг/см²; M_A от $18 \cdot 10^9$ Дж/м³ до $50 \cdot 10^9$ Дж/м³.

$$\sigma = 19,43 \left\{ \ln \left[1,212 \times 10^{-3} \times M_A + \sqrt{(1,212 \times 10^{-3} \times M_A)^2 - 1} \right] \right\}. \quad (11)$$

Оценка ошибки метода $\delta=20\%$.

Определить необходимую глубину измерительных шпуров и параметров максимального сжимающего напряжения σ_1 .

Решение.

1. Глубина измерительных шпуров, согласно формуле (3),

$$l \geq 2(10 / \sqrt{20} - 1) = 2,48 \approx 3 \text{ м}.$$

2. Оценка возможности использования корреляционной зависимости $\sigma = \gamma H = 53,4$ Мпа на глубине $H=200$ м.

3. Расчет индикатрис акустических модулей в кровле и стенке выработки: согласно (4) $\varphi_{кр}=2^{\circ}40'$; $\varphi_{ст}=-34^{\circ}10'$; согласно (5) $M_{Амакр}=31*10^9$ Дж/м³; согласно (6) $M_{Аминкр}=23*10^9$ Дж/м³; $M_{Амакст}=18,5*10^9$ Дж/м³.

4. Определение направления главного напряжения σ_1 . Согласно (7) $\alpha=54^{\circ}10'$; согласно (8) $\beta=-87^{\circ}10'$; согласно (9) $\gamma=-63^{\circ}40'$.

5. Определение величины $M_{Аmax}$ согласно (10) $M_{Аmax}=45*10^9$ Дж/м³.

6. Определением величины σ_1 , согласно (11) $\sigma_1=45,0$ МПа.

Литература

1. Ржевский В.В., Ямицков В.С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. – М.: Наука, 1973.
2. Мамбетов Ш.А. Геоакустический контроль состояния массива пород вблизи горных выработок. – Фрунзе: Илим, 1978.
3. Ямицков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.
4. Мамбетов Ш.А., Абдиев А.Р., Мамбетов А.Ш. Зональная и поэтапная оценка породного массива Тянь-Шаня. – Бишкек: КРСУ, 2003.