

Я.О. Куткин**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ
ДОБРОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД***

Рассмотрены три методики определения акустической добротности. В первой определяется пространственное затухание на двух образцах разной длины путем измерения амплитуд с расчетом добротности по известным формулам. Вторая методика предусматривает регистрацию отклика образца на удар, коэффициент затухания определяется по форме сигнала, уменьшающегося во времени. В третьей методике производятся измерения резонансной частоты и ширины полосы частот на уровне $1/\sqrt{2}$ вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом. Ее достоинство – стабильность результатов, возможность проведения измерений на одном образце, малая погрешность. Для получения искомой взаимозависимости между акустической добротностью и прочностью отбирается группа образцов в количестве 5–8 штук. Производится периодическое усталостное нагружение с различным количеством циклов всех образцов кроме первого, после чего измеряется акустическая добротность и предел прочности при одноосном сжатии. По полученным парам значений добротности Q и прочности σ строится график их взаимозависимости. Приведен пример такой взаимозависимости для известняка Тигинского месторождения, которая имеет вид $\sigma = 31,905 \cdot \ln(Q) - 74,267$ при коэффициентах детерминации $R^2 = 0,97$. Путем измерения добротности можно оценить прочность и ресурс подземных и наземных сооружений без их разрушения.

Ключевые слова: горные породы, акустика, добротность, методика, прочность, взаимозависимость.

Взаимосвязям акустических и механических свойств горных пород посвящено значительное количество публикаций, число которых постоянно возрастает. Это обусловлено как важностью самой тематики, так особенностями и неповторимостью типов, генезиса и мест происхождения горных пород. Для большинства проводимых исследований характерным является то, что изучаются либо только акустические [1–5] либо только механические свойства пород [6–11]. Совместные исследования акустических и механических свойств ограничиваются, как правило, взаимосвязями упругих и акустических свойств [12], прочностных свойств и скоростей

упругих волн [13, 14], а также деформационных характеристик горных пород и скоростей упругих волн [15, 16]. В [1] приведены результаты исследований акустической добротности Q в материалах с высокой концентрацией внутренних дефектов во взаимосвязи с напряженным состоянием, однако ее связь с пределом прочности не рассматривается.

Как следует из этого краткого обзора, взаимосвязям прочностных и динамических акустических свойств горных пород, таких, как акустическая добротность или декремент затухания, уделяется недостаточно внимания. В то же время такие взаимосвязи важны для прогнозирования предела

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 14-05-00362.

прочности пород по неразрушающим измерениям их акустической добротности Q .

По сравнению со скоростями упругих волн при оценке нарушенности внутренней структуры пород акустическая добротность является более чувствительным параметром. Измерение последней позволит определять остаточную прочность и ресурсы зданий, сооружений, а также конструктивных элементов систем разработки на горных предприятиях, что важно для обеспечения эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых [17, 18].

Поэтому при исследовании горных пород необходимо устанавливать взаимосвязи акустических свойств и, в частности, их динамических характеристик, не только с упругими и пластическими, но и с прочностными свойствами.

Рассмотрим комплекс таких взаимосвязей на примере результатов испытаний образцов известняка с целью оценки остаточной прочности пород по их акустической добротности.

При проведении экспериментов были опробованы три методики определения акустической добротности Q .

1. Через пространственное затухание, определяемое в 2 точках пространства по формуле

$$Q = \frac{\pi f_0}{\delta_s v} = \frac{\pi f_0 (x_2 - x_1)}{\ln \left[\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right] v}$$

где $\delta_s = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left[\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \right]$ – пространственный коэффициент затухания;

$x_1, x_2, p(x_1), p(x_2)$ – расстояния от источника упругих волн до точек измерения и соответствующие амплитуды сигналов; v – скорость распространения упругих волн; f_0 – частота регистрируемых колебаний. При измере-

ниях по этой методике необходимо либо брать два образца разной длины, либо один образец, от которого отпиливается часть, что неудобно и вносит определенные погрешности в результаты.

2. Путем измерения коэффициента затухания колебаний в одной точке, возбуждаемых ударом

$$Q = \frac{\pi f_0}{\delta_t},$$

где δ_t – временной коэффициент затухания свободных колебаний; f_0 – частота регистрируемых колебаний.

3. Путем измерения резонансной частоты и ширины полосы частот вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом по формуле

$$Q = \frac{f_0}{f_{\max} - f_{\min}},$$

где f_0 – резонансная частота, определяется по максимуму амплитуды гармонического сигнала, прошедшего через образец; f_{\max}, f_{\min} – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания сигнала на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимального значения амплитуды при резонансе. Внешний вид и схема установки для измерений по этой методике представлены на рис. 1.

Ориентировочное значение резонансной частоты определяется через предварительно измеренное значение скорости

$$f_0 = \frac{v}{2h},$$

где v – скорость распространения упругих волн соответствующего типа (продольные или поперечные); h – база прозвучивания образца. Затем это значение уточняется уже при прозвучивании образца и определении добротности.

К достоинствам этой методики следует отнести возможность проведения

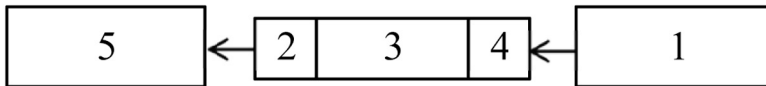
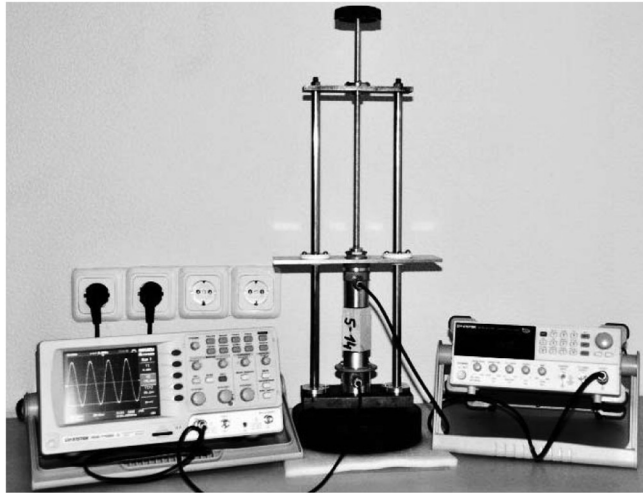


Рис. 1. Внешний вид установки и схема измерений акустической добротности по третьей методике: 1 – генератор GW INSTEK SFG-2110, 2, 4 – преобразователи ультразвуковые, 3 – образец, 5 – осциллограф цифровой GW INSTEK GDS-71022

измерений на одном образце, стабильность показаний. Необходимым условием является использование высокостабильного генератора. Этому условию отвечают современные перестраиваемые генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, поддерживающие ее заданное значение при измерениях в области резонанса.

Необходимым условием всех перечисленных выше вариантов измерений является высокая собственная добротность преобразователей, что особенно необходимо при измерениях на высокодобротных породах, как, например, долериты и габбро.

После практической оценки всех вариантов с учетом технологичности, удобства проведения измерений и стабильности получаемых результатов предпочтение было отдано третьей методике определения акустической добротности, хотя другие также были использованы.

Для получения искомой взаимозависимости между акустической добротностью и прочностью отбирается группа образцов в количестве 5–8 штук. Производится периодическое усталостное нагружение с различным количеством циклов всех образцов кроме первого, после чего измеряется акустическая добротность и предел прочности при одноосном сжатии. По полученным парам значений добротности Q и прочности σ строится график их взаимозависимости.

В качестве примера результатов по данной методике приведем экспериментальную зависимость известняка Тигинского месторождения. Образцы подвергались циклическим испытаниям с постоянной нагрузкой 0,3 от разрушающей. На рис. 2 приведены результаты данных испытаний для циклов в количестве 0, 10, 20, 30, 40.

Как видно из взаимозависимостей с увеличением разрушающего

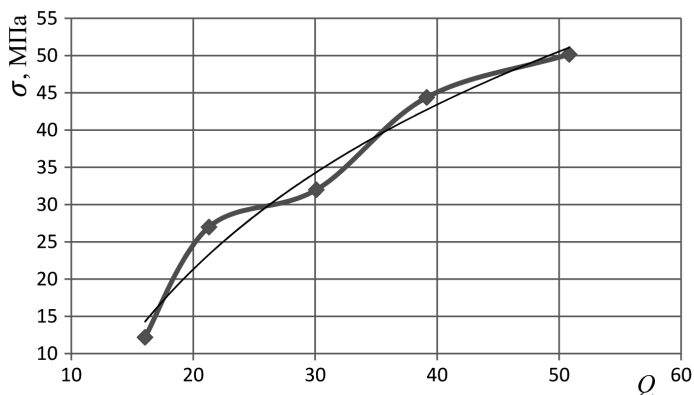


Рис. 2. Взаимозависимость между добротностью Q и остаточной прочностью σ известняка Тигинского месторождения при максимальных механических нагрузках в цикле 0,3

воздействия уменьшается акустическая добротность. Эта связь может быть аппроксимирована логарифмической зависимостью $\sigma = 31,905 \cdot \ln(Q) - 74,267$ при коэффициентах детерминации $R^2 = 0,97$. Путем измерения добротности можно без разрушения оценить прочность и ресурс наземных или подземных сооружений, как, например, целики и кровля выработок.

Выводы

1. В настоящее время количество исследований взаимосвязей между прочностью и акустической добротностью различных типов горных пород мало, либо они отсутствуют вообще, в то же время их польза для практики несомненна.

2. Из представленных трех методик определения акустической доб-

ротности наиболее стабильные результаты показывает третья методика определения, основанная на измерении резонансной частоты и ширины полосы частот вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом.

3. Породы различных типов проявляют отчетливую взаимозависимость между акустической добротностью и прочностью, которая может быть использована для прогнозирования прочности и ресурса геоматериала без его разрушения, например, в целиках и кровле подземных выработок.

Автор выражает благодарность Иванову В.Б. и Дубинину П.И. за помощь при изготовлении экспериментальной установки и подготовке образцов пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев А.В., Островский Л.А., Сутин А.М., Соустова И.А., Джонсон П.А. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях // Акустический журнал. – 2003. – т. 49. – № 1. – С. 92–99.

2. Tittmann В.В., Abdel-Gawad М., Housley R.M. Elastic velocity and Q factor

measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks / Proceedings of the Third Lunar Science Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta). The M.I.T. Press. – 1972, Vol. 3. – Pp. 2565–2575.

3. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / Отв.

ред. В.Н. Страхов. – М.: Наука. – 2003. – 270 с.

4. Шкуратник В.Л., Данилов Г.В. Исследование влияния напряжений на скорость распространения упругих волн в окрестностях эллиптической горной выработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 3. – С. 3–10.

5. Данилов В.Н., Шкуратник В.Л., Сирота Д.Н. Зависимость между акустическими характеристиками и напряжениями в массиве горных пород // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 2.

6. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 272 с.

7. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1975. – 208 с.

8. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука. – 2001. – 343 с.

9. Katz O., Reches Z., Roegiers J.-C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. – 2000, 37, № 4. – Pp. 723–728.

10. Сукнев С.В. Методика определения статического модуля упругости и коэффициента Пуассона при изменении температуры образца // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 101–105.

11. Hongjun L., Xianchun Ch., Jiefeng M. Mechanic property of perennial frozen earth // Journal of Northeast Forestry University. – 2005. – Issue 2. – Pp. 102–103.

12. Ulrich T.J., McCall K.R., Guyer R.A. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy //

J. Acoust. Soc. Amer. – 2002. – 111, № 4. – Pp. 1667–1674.

13. Keshavarz M., Pellet F. L. and Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C // Pure and Applied Geophysics. – 2010. – № 167. – Pp. 1511–1523.

14. Pellet F.L., Fabre G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks // International journal of geomechanics. – 2007, vol. 7, № 6. – Pp. 431–436.

15. Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестник ПГТУ. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. – 2010. – № 5. – С. 82–85.

16. Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л. Изучение скорости прохождения продольных волн при деформировании силвинитовых образцов / Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы Региональной научно-практической конференции. Пермь, 19–20 мая, 2009. – Пермь: ПермГУб 2009. – С. 399–402.

17. Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности оперативной оценки состояния анкерного крепления и кровли подземных горных выработок акустическими методами / Наукові праці УкрНДМІ НАН України. Випуск 13 Частина I / Під заг. ред. А.В. Анциферова. – Донецьк, УкрНДМІ НАН України. – 2013. – С. 183–196.

18. Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности определения резерва прочности анкерного крепления кровли методами неразрушающего контроля / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 2013, том 1. – С. 337–342. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Куткин Ярослав Олегович – аспирант, e-mail: kutnew@mail.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.831:542:34

SUBSTANTIATION OF METHODS FOR DETERMINING THE ACOUSTIC QUALITY FACTOR INTERDEPENDENCIES AND ROCK STRENGTH

Kutkin Ya.O., Graduate Student, e-mail: kutnew@mail.ru, MGI NITU «MISiS».

A review of papers in the field of rock properties has shown a lack of works on the interrelation of acoustic quality and fatigue strength. This paper presents 3 methods of determining the acoustic quality factor. The first

is determined by the spatial damping on two samples of different length by measuring the amplitudes of the Q-factor and calculation with the known formulas. The disadvantage is a large measurement error due to the measurement value at each of the two different samples. The second method uses the response registration of the sample on the impulse strike. The damping and Q coefficients have been determined by the waveform decreases versus time. The disadvantage is a strong influence of the transducers characteristics on the output waveform and a Q-factor. In the third method, measurements of the resonance frequency and bandwidth at $1/\sqrt{2}$ level near resonance in the sample during harmonic signal sounding have been used. Its advantage – stability of the results, the possibility of carrying out measurements on the one sample, a small error. To obtain the relationship between the acoustic quality factor and the strength have been used the group of samples in an amount of 5–8 pieces. Periodic fatigue loading with different number of cycles of all samples except the first one have been made, and then measure the acoustic quality factor and strength under uniaxial compression. According to the obtained value, with the use of pairs of Q factor and strength σ , their interdependence have been calculated. An example of such interdependence for the limestone of the Tiginskoye deposit (Russia) has the following form $\sigma = 31.905 \cdot \ln(Q) - 74.267$ with coefficient of determination 0.97.

Key words: rock, acoustics, quality factor, method, rock strength, interdependence.

REFERENCES

1. Lebedev A.V., Ostrovskii L.A., Sutin A.M., Soustova I.A., Dzhonson P.A. *Akusticheskii zhurnal*, 2003, vol. 49, no 1, pp. 92–99.
2. Tittmann B.R., Abdel-Gawad M., Housley R.M. Elastic velocity and Q factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks. *Proceedings of the Third Lunar Science Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta)*. The M.I.T. Press. 1972, vol. 3, pp. 2565–2575.
3. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. *Fizika zemletryaseni i predvestniki*. Otv. red. V.N. Strakhov (Physics of earthquakes and precursors. Strakhov V.N. (Ed.)), Moscow, Nauka, 2003, 270 p.
4. Shkuratnik V.L., Danilov G.V. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2005, no 3, pp. 3–10.
5. Danilov V.N., Shkuratnik V.L., Sirota D.N. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, 1988, no 2.
6. Kartashov Yu.M., Matveev B.V., Mikheev G.V., Fadeev A.B. *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* (Strength and deformability of rock), Moscow, Nedra, 1979, 272 p.
7. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. *Mekhanika gornykh porod: Ucheb. dlya vuzov* (Rock mechanics: Text-book for universities), Moscow, Nedra, 1975, 208 p.
8. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. *Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornykh porod* (Experimental physics and mechanics of rock), Saint-Petersburg, Nauka. 2001, 343 p.
9. Katz O., Reches Z., Roegiers J.-C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci.* 2000, 37, no 4, pp. 723–728.
10. Suknev S.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2013, no 8, pp. 101–105.
11. Hongjun L., Xianchun Ch., Jiefeng M. Mechanic property of perennial frozen earth. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, Issue 2, pp. 102–103.
12. Ulrich T.J., McCall K.R., Guyer R.A. Determination of elastic moduli of rock samples using resonant ultrasound spectroscopy. *J. Acoust. Soc. Amer.* 2002, 111, no 4, pp. 1667–1674.
13. Keshavarz M., Pellet F. L. and Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C. *Pure and Applied Geophysics*. 2010, no 167, pp. 1511–1523.
14. Pellet F.L., Fabre G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks. *International journal of geomechanics*. 2007, vol. 7, no 6, pp. 431–436.
15. Bel'tyukov N.L., Evseev A.V. *Vestnik PGTU. Geologiya, geoinformatsionnye sistemy, gorno-neftyanoe delo*. 2010, no 5, pp. 82–85.
16. Bel'tyukov N.L., Pan'kov I.L. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala: Materialy Regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Geology and mineral resources of the Western Urals: Materials of the Regional scientific-practical conference), Perm, May 19–20, 2009, Perm, PermGUb, 2009, pp. 399–402.
17. Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. Випуск 13 Частина I. Під заг. ред. А.В. Анциферова. Донецьк, УкрНДМІ НАН України. 2013, pp. 183–196.
18. Voznesenskii A.S., Kutkin Ya.O., Krasilov M.N. *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli. Trudy XX Vserossiiskoi konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh* (Geodynamics and stress state of the Earth's interior. Proceedings of the XXth Russian conference with the participation of foreign scientists), Novosibirsk, 2013, vol. 1, pp. 337–342.

